

Numerická analýza a tvarová optimalizace pryžové manžety

Bc. Jan Turýn

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan TURÝN**
Osobní číslo: **T090575**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Numerická analýza a tvarová optimalizace pryžové manžety**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární přehled na dané téma
2. Vyhodnoťte numerickou analýzu současných výrobků
3. Navrhněte optimalizaci výrobků
4. Proveďte analýzu a vyhodnocení návrhu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jakub Javořík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je numericky analyzovat a optimalizovat tvar pryžové manžety při jejím stlačování tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného stlačení dle daných kritérií.

Teoretická část se zabývá elastomery, jejich vlastnostmi, zkoušením a základními druhy těchto materiálů. Jsou popsány hyperplastické modely používané pro výpočet FEA. V této části práce jsou také uvedeny základní pravidla pro konstrukci pryžových výrobků.

V praktické části je nejdříve analyzována původní manžeta, následně jsou zjištěny závislosti tvaru na chování výrobku při stlačování. Nakonec je dle těchto výsledků navržen konečný tvar pryžové manžety.

Klíčová slova: Elastomer, pryž, hyperelastická, MKP, Patran, Marc, MSC, jednoosý tah, dvouosý tah, hyperelastické modely, analýza

ABSTRACT

The aim of this thesis is to numerically analyse and optimize the shape of rubber gasket during compression in order to achieve the uniform compression according to given criteria.

The theoretical part of thesis is focused on elastomers, their features, testing and basic sorts of these materials. There are described hyperelastic models used for calculation FEA. In this part are also mentioned the basic rules for the construction of rubber products.

In the practical part of this thesis there is firstly analysed the original gasket and subsequently is found the relation, how does the shape is influenced by the reaction of product during compression. According to obtained results there is designed the final shape of rubber gasket.

Keywords: Elastomers, rubber, hyperelasticity, FEA, FEM, Patran, Marc, MSC, uniaxial tension, biaxial tension, hyperelastic models, analysis

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a poskytování cenných rad a připomínek při řešení této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 MAKROMOLEKULÁRNÍ LÁTKY	13
2 ELASTOMERY	16
2.1 PŘÍRODNÍ KAUČUKY	16
2.2 SYNTETICKÉ KAUČUKY	17
2.2.1 Butadien-styrenový kaučuk (SBR)	17
2.2.2 Polybutadienové kaučuky (BR)	17
2.2.3 Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR).....	18
2.2.4 Chloroprenový kaučuk (CR).....	18
2.2.5 Polyisopren (IR)	19
2.2.6 Butylkaučuk (IIR)	19
2.2.7 Silikonový kaučuk (Q)	20
2.2.8 Etylénpropylénový kaučuk (EPDM).....	20
2.2.9 Polyuretanový kaučuk (UR, U).....	20
2.3 VŠEOBECNÉ VLASTNOSTI ELASTOMERŮ	21
2.4 GUMÁRENSKÉ SMĚSI	22
2.4.1 Kaučuky	23
2.4.2 Plniva.....	23
2.4.3 Změkčovadla	24
2.4.4 Vulkanizační činidla.....	24
2.4.5 Urychlovače vulkanizace	25
2.4.6 Retardéry vulkanizace	25
2.4.7 Antioxidanty, antiozonanty	25
2.4.8 Nadouvadla	26
2.4.9 Pigmenty, barviva	26
2.5 PLASTIKACE KAUČUKU	26
2.6 VULKANIZACE.....	27
3 HYPERELASTICITA	29
3.1 HYPERELASTICKÉ MODELY	30
3.1.1 Polynomická funkce.....	30
3.1.2 Neo-Hookean	30
3.1.3 Yeoh	31
3.1.4 Mooney-Rivlin	31
3.1.5 Arruda-Boyce	32
3.1.6 Gent	32
3.1.7 Ogden	33
3.2 STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH KONSTANT	34
4 KONSTRUKCE PRYŽOVÝCH VÝROBKŮ	37
4.1 TLOUŠŤKA STĚNY PRYŽOVÝCH VÝROBKŮ	37
4.1.1 Přejchody a různé tloušťky stěn	38

4.2	ZAOBLENÍ HRAN	39
4.3	OKRAJE PRYŽOVÝCH VÝROBKŮ	39
4.4	VÝROBKY Z MĚKKÉ PRYŽE	40
4.5	OTVORY	41
4.6	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ FOREM	42
4.7	UMÍSTĚNÍ DĚLÍCÍ ROVINY FORMY	43
5	PRYŽOVÉ TĚSNĚNÍ.....	45
6	ZÁKLADNÍ ZKOUŠKY VÝROBKŮ Z PRYŽE.....	50
6.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	50
6.2	TLAKOVÁ ZKOUŠKA	52
6.3	ZKOUŠKA VE SMYKU	54
6.4	ZKOUŠKA ODRAZOVÉ PRUŽNOSTI.....	55
6.5	ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	56
6.6	ZKOUŠKY STRUKTURNÍ PEVNOSTI	56
6.7	ZKOUŠKA KŘEHKOSTI ZA NÍZKÝCH TEPLOT	56
6.8	ZKOUŠKY STÁRNUTÍ.....	57
6.9	ZKOUŠKA BOBTNÁNÍ	57
6.10	PROPUSTNOST PRO PLYNY A KAPALINY	58
II	PRAKTICKÁ ČÁST	59
7	STANOVENÍ CÍLŮ	60
8	SOFTWAREVÁ PODPORA	61
8.1	MSC. PATRAN.....	61
8.2	MSC. MARC/MENTAT	62
9	TVORBA 3D MODELU	63
10	NASTAVENÍ ANALÝZY MODELU POMOCÍ FEM SOFTWARE	65
10.1	VYTVOŘENÍ NOVÉ DATABÁZE	65
10.2	IMPORT MODELU SOUČÁSTI	65
10.3	DEFINICE MATERIÁLU	66
10.4	DEFINICE VLASTNOSTÍ ELEMENTU.....	67
10.5	TVORBA FEM SÍTĚ	67
10.6	DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	68
10.7	SPUŠTĚNÍ ANALÝZY.....	69
11	TVAROVÁ OPTIMALIZACE	71
11.1	ANALÝZA SOUČASNÉHO NÁVRHU.....	73
11.2	VLIV TVAROVÝCH PARAMETRŮ NA STLAČOVÁNÍ MANŽETY	77
11.2.1	Úprava velikosti vnějších rádiusů R_1 a R_3	77
11.2.2	Úprava velikosti vnitřních rádiusů R_2 a R_4	79
11.2.3	Úprava velikosti vnitřních rádiusů R_1 a R_3 při stejné velikosti.....	81
11.2.4	Úprava velikosti vnitřních rádiusů R_2 a R_4 při stejné velikosti.....	82
11.2.5	Úprava velikosti tloušťek t_1, t_2, t_3 při stejné velikosti	84
12	DISKUZE A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	86
	ZÁVĚR	91

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	94
SEZNAM OBRÁZKŮ	96
SEZNAM TABULEK.....	99
SEZNAM GRAFŮ	100
SEZNAM PŘÍLOH.....	101

ÚVOD

Eleastomery patří do skupiny polymerů a jsou významným konstrukčním materiálem, se kterým je možné se setkat snad v každém výrobním oboru, stroji, přístroji či zařízení. [7]

Vlastnosti konstrukčních elastomerů se v mnoha směrech liší od ostatních konstrukčních materiálů. Jsou to zejména vysoká elasticita (hyperelasticita), schopnost snášet opakovaně značnou deformaci při dlouhé životnosti, schopnost tlumení (přeměňovat energii mechanickou na tepelnou), chemická stabilita v řadě prostředí, elektrické vlastnosti, nepropustnosti pro tekutiny a další. [5]

S rozvojem elastomerů rostla a rozvíjela se i teoretická oblast. Ta byla zaměřena na poznání chemické části elastomerů a gumárenských surovin, rozvoj technologie zpracování elastomerů a do značné hloubky i oblast metodiky návrhu konstrukce a matematických přístupů k řešení elastomerních prvků. Tento rozvoj vedl k využití metody konečných prvků při použití výpočetní techniky. [7]

Základním principem metody konečných prvků je rozdělení kontinua do velkého množství konečných plošných nebo i prostorových prvků vhodného tvaru. Tato metoda přinesla možnost řešení analýzy pomocí nalezení řešitelného matematického modelu s přijatelnou chybou. Intenzivní vývoj nelineárních hyperelastických materiálových modelů probíhá od 2. pol. 20. století. Tyto modely jsou založeny na definici vztahu pro hustotu deformační energie. V průběhu posledních 60 let bylo různými autory postupně navrženo velké množství hyperelastických modelů. [4] Možnost simulovat použití výrobku nebo technického zařízení a také prověřit jeho chování za různých podmínek bez nutnosti pořizovat fyzický model značně urychluje a zlevňuje výzkum a vývoj. Metoda se používá pro řešení problémů pružnosti a dynamiky, ale i k řešení proudění kapalin a plynů, vedení tepla, záření, elektromagnetismus, akustiku, mechaniku hornin a další. [10]

Teoretická část je zaměřena na elastomerní materiály, popisuje základní typy těchto materiálů, jejich vlastnosti a složení. Jsou zde rozebrány hyperelastické modely používané pro výpočet pomocí metody konečných prvků. Obsahem teoretické části jsou také základní pravidla, kterými by se měl konstruktér řídit při konstrukci pryžových výrobků.

Cílem praktické části je simulovat pomocí FEM softwaru stlačování pryžové manžety. Tvar tohoto výrobku je třeba analyzovat a optimalizovat tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného stlačení dle daných kritérií.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MAKROMOLEKULÁRNÍ LÁTKY

Polymery jsou látky tvořené makromolekulami s převážným obsahem prvků uhlíku C, kyslíku O, vodíku H, dusíku N, chloru Cl a jiných chemických prvků. Jejich použití je ve většině případů z hlediska fyziky ve stavu pevném a tuhém, pastovitém, ve zvláštních případech i ve stavu tekutém (např. součásti mazacích tekutin apod.). Technologie zpracování polymerů obvykle prochází kapalným, nebo pastovitým stavem, kdy budoucímu výrobku určuje tvar zejména technologické zařízení a to většinou za zpracovatelské teploty a tlaku, někdy i v průběhu časového intervalu. [5]

Základní stavební jednotkou polymerů je tzv. monomer (nízkomolekulární látka). Nejjednodušší uspořádání stavebních jednotek v molekule se nazývá strukturní jednotka. Některé makromolekuly mají totožnou stavební a strukturní jednotku jako například polypropylen. Spojováním strukturních jednotek vznikají makromolekulární látky. Děje se tak pomocí tzv. polyreakcí, kdy vznikají řetězce dlouhých molekul, jejichž molekulová struktura může být amorfní, semikrystalická anebo krystalická. Krystalické polymery jsou tvrdé a křehké. Semikrystalické polymery vykazují pružné deformace, tok (creep) i plastické deformace.

Rozdělení polymerních materiálů je následující:

1.) Podle původu

- Přírodní: jsou to celulóza, glukosový polysacharid, který je základním stavebním materiálem většiny rostlin, ale i základem k výrobě viskózních vláken nazývaných umělé hedvábí, přírodní vlákna (konopí, juta, bavlna, jantar), přírodní pryskyřice (jantar, sosnová pryskyřice, olivová pryskyřice), přírodní kaučuk (měkká pryž, tvrdá pryž).

- Syntetické: uměle vytvořená, patří sem většina plastů: termoplasty (polyetylén, polypropylén, PVC, polystyrén, polymethylmetakrylát, polyamid), reaktoplasty (polyuretan, polyesterové, epoxidové a fenolové pryskyřice), elastomery (silikony, styrol-butadien, polyizopren, butadien-akrilonitril)

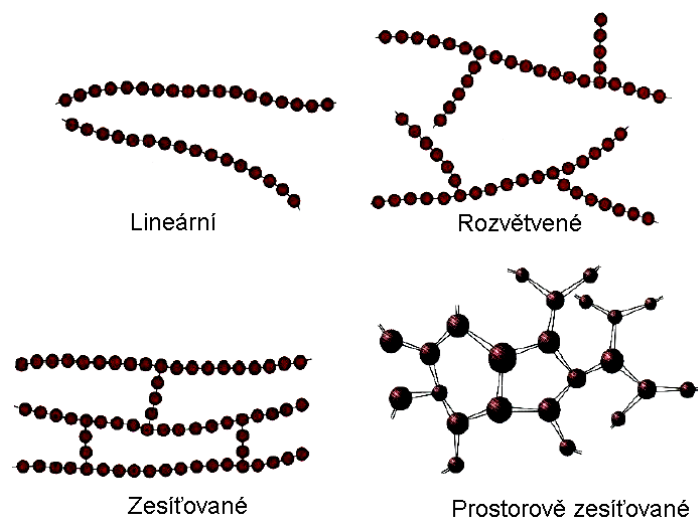
2.) Podle struktury makromolekul

- Lineární - Při dvou reakčních místech v molekule jsou molekuly schopné chemicky se vázat se dvěma sousedními molekulami. Tak vznikají lineární molekuly ve tvaru jednoduchého řetězce a hmota se nazývá lineární polymer.

- Rozvětvené - Polymery s makromolekulami, vyznačující se hlavním řetězcem, z něhož vystupují postranní větve, se nazývají rozvětvené polymery. Celá struktura má menší hustotu, než lineární polymery.

- Zesíťované - Sousední řetězce tohoto polymeru, jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silné kovalentní vazby. Sem patří různé elastické materiály, jako je např. přírodní i syntetický kaučuk

- Prostorově zesíťované - Při třech a více reakce schopných místech se mohou strukturální jednotky spojovat také směrem do prostoru a vznikají prostorově zesíťované molekuly. Tyto polymery mají díky svým zesíťovaným molekulám jiné fyzikální a chemické vlastnosti než polymery lineární. Patří sem epoxidy a fenolformaldehydy. [15]



Obr. č. 1 - Struktura polymerů [15]

3.) Podle chování za tepla:

- Termoplasty - látky, které působením tepla měknou, stávají se plastické, mohou se tvarovat. Po ochlazení opět tvrdnou, aniž se mění jejich chemické složení, přičemž tyto přeměny jsou vratné. Mezi makromolekulami vznikají fyzikální vazby. Pevná látka může být amorfni, nebo krystalická.

- Reaktoplasty - látky, které se působením tepla chemicky mění, tvrdnou, po vytvrzení se jejich tvar teplem nemění, do plastického stavu je již nelze převést. Takové přeměny jsou tedy nevratné. Proti termoplastům vynikají reaktoplasty tuhostí a tvrdostí, teplotní odolností a tvarovou stálostí za tepla, odolností proti korozi za napětí a proti vlivům povětrnosti. Modul pružnosti není tolik závislý na teplotě jako u termoplastů, takže mechanické

vlastnosti reaktoplastů nejsou v rozmezí používaných teplot příliš proměnlivé. Nevýhodou je nepatrná tažnost. [15]

- Eleastomery – známé také pod názvem pryž. Jsou látky, které působením tepla měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. [15] Jelikož se tato diplomová práce zabývá výrobkem právě z tohoto druhu polymeru, budou tyto materiály blíže rozebrány v následující kapitole.

4.) Podle toho, zda vznikly:

- Polymerací – Polymerace je chemická reakce, při níž se molekuly jednoduché organické sloučeniny slučují a tvoří makromolekulární látky bez vzniku vedlejšího produktu. Polymerovat může pouze ta sloučenina, která má aspoň jednu dvojnou vazbu, např. ethylen, propylen, vinylchlorid atd.

- Polykondenzací – Polykondenzace je reakce při, které reagují dva stejné nebo různé monomery, které obsahují dvě nebo více reakčních funkčních skupin. V průběhu reakce nevzniká jenom polymer, ale i nízkomolekulární produkt (např. voda, methanol, amoniak).

- Polyadici – Polyadice se podobá polykondenzaci, rozdíl je ten, že při polyadici nevzniká jako vedlejší produkt nízkomolekulární látka.

5.) Podle chemického složení

- Polyolefiny
- Polystyrény
- Chlorované
- Fluorované
- Polyestery
- Akryláty
- Polyamidy
- Polyuretany

2 ELASTOMERY

Makromolekulární látky, které mají řetězce řídce zesíťované, což umožňuje velkou pohyblivost makromolekulární sítě. Elastomery lze obecně považovat za vysoce kondenzované plyny, protože většina dílčích monomerů se vyskytuje v plynném skupenství. Kaučuky jsou typické amorfní polymery s náhodným uspořádáním molekul. Tyto materiály jsou směsí amorfních polymerů a dalších přísad. Elastomer je výjimečný svou velkou pružnou deformací. Elastomerní materiály patří do hlavní skupiny polymerů, které dále rozdělujeme do dvou podskupin: [5]

- přírodní
- syntetické

V praxi je možné definovat vlastnosti tohoto materiálu a využít numerické systémy k analýze jeho chování. Pro tyto účely je nutná dostupnost materiálových hodnot jako i okrajové podmínky případného výpočtu a analýzy. [5]

2.1 Přírodní kaučuky

Přírodní kaučuk se získává čepováním z kaučukodárných rostlin, především stromů, jichž se vyskytuje asi na 500 druhů, při čemž nejznámější je druh *Hevea Brasiliensis*. Kaučukovníky se uměle pěstují přibližně od roku 1900 na plantážích v tropických pásmech Jižní Ameriky, jihovýchodní Asie i Afriky. Po nařiznutí kůry stromu vytéká bílá, mlékovitá kapalina zvaná latex, která obsahuje 30 - 40% koloidních částic kaučuku (koloidní částicí se myslí látky, které nejsou schopny krystalizace). Z jediného stromu lze získat 5 - 25 kg kaučuku. [5]

Před vlastní přípravou směsi se zpracovává tzv. lámáním. Příliš dlouhé řetězce se při něm štěpí účinkem vzdušného kyslíku v místě dvojných vazeb. Kaučuk se vysráží např. kyselinou mravenčí, vypere vodou a suší, buď jen teplým vzduchem (bílá krepa) nebo dýmem (hnědá krepa, jinak též uzený kaučuk). Rozvoj automobilového průmyslu a s ním rostoucí spotřeba kaučuku na výrobu pneumatik přiměl chemiky k hledání způsobu výroby kaučuku syntetického. I když se dnes vyrábí desítky druhů různých syntetických kaučuků, přírodní kaučuk se používá stále, protože dodává směsím žádané vlastnosti. [15]

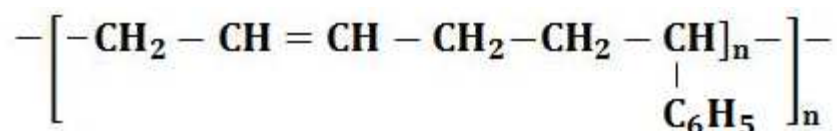
2.2 Syntetické kaučuky

Hlavní rozdíl mezi přírodními a syntetickými kaučuky spočívá v technologii jejich výroby. U přírodního kaučuku je výrobní proces proveden prostřednictvím přírody, uvnitř stromu, přičemž kaučukovník roste minimálně 6 let, než začne produkovat. Výroba syntetického kaučuku potřebuje výrobu monomerů, nejčastěji z petrochemických surovin, kdy poté dojde k jejich polymeraci. [12]

Průmyslově se vyrábí a používá velké množství syntetických kaučuků, které se liší charakterem monomerů, poměrem monomerů při kopolymeraci, podmínkami výroby a způsobem polymerace, typem katalyzátorů nebo druhem použitých stabilizátorů apod. [12] V rámci jednotlivých skupin se vyrábí větší množství typů a druhů lišící se viskozitou, množstvím komonoméru nebo způsobem přípravy. Označují se různými obchodními názvy, zkratkami a číslicemi, avšak všude se zachovává typové označení podle stanovených norem. Ke každému typu kaučuku je výrobce povinný dodat materiálový list s přesnou charakteristikou výrobku, technicko-přebíracími podmínkami skladování a manipulace, jako i bezpečnostní list s charakteristikou zdravotní nezávadnosti. [12]

2.2.1 Butadien-styrenový kaučuk (SBR)

Je univerzální kaučuk, který představuje asi 60% světové výroby syntetických kaučuků. [5] Butadienstyrenový kaučuk se vyrábí v mnoha typech. Vlastnosti jednotlivých typů se přizpůsobují potřebám aplikace. Tyto kaučuky mají všeobecné použití, jsou však málo vhodné pro výrobu automobilových plášťů nákladních a leteckých a plášťů pro velké rychlosti a dynamicky namáhané pryže. Hlavní aplikací butadienstyrenových kaučuků je výroba obuvi, technické pryže, kabelů a spotřebního zboží. [8]

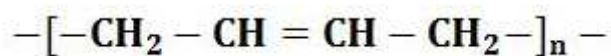


Obr. č. 2 - Strukturální vzorec SBR

2.2.2 Polybutadienové kaučuky (BR)

Vyrábí se především roztokovou polymerací pomocí organicko-kovových katalyzátorů, kdy vznikají produkty s vysokým podílem 1,4-butadienových jednotek. Polybutadieny s vysokým podílem cis-1,4-butadienových jednotek se vyznačují vysokou odolností proti

oděru, vzniku trhlin a také vyšší odrazovou pružností, než přírodní kaučuk. Mimoto dobře snášejí plniva. Aplikují se hlavně v průmyslu k výrobě pneumatik. [5]

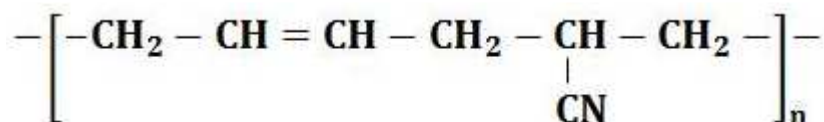


Obr. č. 3 - Strukturální vzorec BR

2.2.3 Butadien-akrylonitrilový kaučuk (NBR)

Nitrilkaučuk je emulzní kopolymer butadienu s akrylonitrilem. Polymeruje se za tepla i za studena. Význačnou vlastností nitrilkaučuků je jejich dobrá odolnost proti působení olejů, která závisí na obsahu akrylonitrilu v kaučuku. Nejlépe odolávají olejům kaučuky s největším obsahem akrylonitrilu. Nitrilkaučuky jsou speciálním typem kaučuku, který má velký význam pro výrobu pryží dobře odolávajících působení kapalin, např. aromatických a alifatických uhlovodíků, chlorovaných uhlovodíků, heterocyklických sloučenin apod. [8]

Typy nitrilových kaučuků se vyrábějí radikálovou kopolymerací butadienu s 18 až 49% akrylonitrilu, nejčastěji však v rozmezí 28 až 33% akrylonitrilu. Se vzrůstajícím obsahem akrylonitrilu stoupá teplota skelného přechodu a tvrdost, klesá elasticita a bobtnavost v pohonných látkách a olejích. Hlavní oblastí použití jsou benzínové hadice, těsnění, klínové řemeny, dopravní pásy, válce pro tiskařský, textilní a papírenský průmysl. [5]

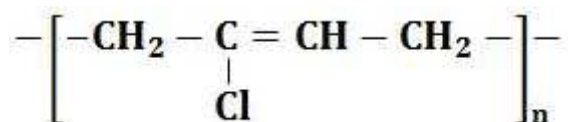


Obr. č. 4 - Strukturální vzorec NBR

2.2.4 Chloroprenový kaučuk (CR)

Chloropren je nejjednodušším chlórderivátem butadienu. Přítomnost a poloha atomu chlóru v molekule chloroprenu zvyšuje ve srovnání s butadienem jeho sklon k polymeraci. Chloropren polymeruje také samovolně; asi za deset dní vytvoří tuhou zesíťovanou látku. [8]

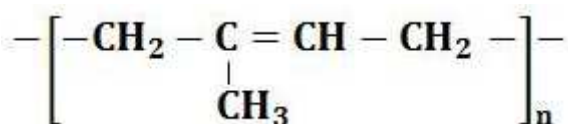
Vzhledem k přítomnosti chlóru v molekule lze z chloroprenu vyrábět polymeraci kaučuky, které dobře odolávají působení olejů, ozónu, povětrnostních změn a vlhkosti a jsou těžko zápalné. Lze z nich zesíťováním (vulkanizací) vyrábět pryže, které odolávají uvedeným vlivům ještě lépe. [8]



Obr. č. 5 - Strukturální vzorec CR

2.2.5 Polyisopren (IR)

Přírodní kaučuk je téměř stoprocentní cis-1,4-polyisopren. Syntetický polyisoprenový kaučuk je stereospecifický, roztokově polymerovaný cis-1,4-polyisopren, jehož struktura a vlastnosti jsou natolik podobné kaučuku přírodnímu, že je lze ve většině aplikací zaměnit. [5]

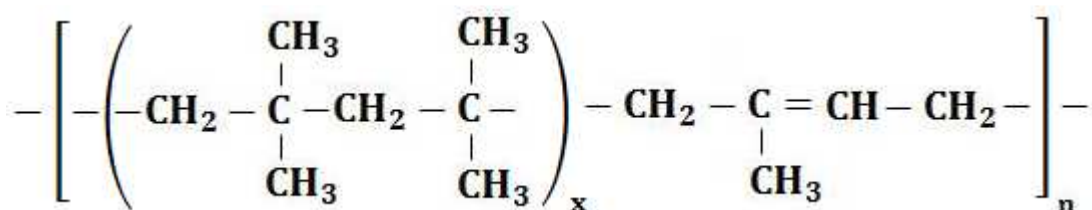


Obr. č. 6 - Strukturální vzorec IR

2.2.6 Butylkaučuk (IIR)

Butylkaučuk je kopolymer izobutylénu a malého množství izoprenu (asi do 2 mol. % na kaučuk). Butylkaučuk nelze míchat s polyizoprenovým, polybutadienovým ani butadien-styrénovým kaučukem. Vysvětluje se to tím, že s nimi vulkanizační činidla reagují dříve, protože jde o nenasycené kaučuky. Butylkaučuk lze však mísit a vulkanizovat s chloroprenovým kaučukem.

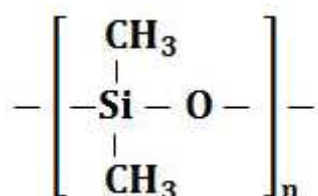
Butylkaučuk je vhodný pro pryže s vynikající nepropustností pro plyny, s výbornou odolností proti působení chemických činidel a oxidačních roztoků. Dává pryžím dobré elektrické vlastnosti, ale velmi špatnou pružnost za chladu, lepší za vyšších teplot. Je to kaučuk krystalující při napětí. [8]



Obr. č. 7 - Strukturální vzorec IIR

2.2.7 Silikonový kaučuk (Q)

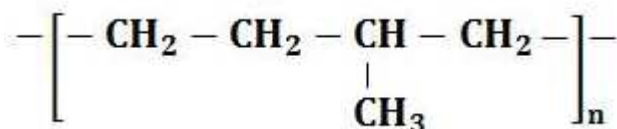
Výrobky z tohoto druhu kaučuku mají široké uplatnění, lze jich využívat v širokém rozmezí teplot od -150° až do $+250^{\circ}\text{C}$. Vyznačují se vysokou odolností proti rozpouštědlům a ultrafialovému záření, malou hořlavostí, odolností proti oxidaci a také šetrností vůči lidskému organismu.



Obr. č. 8 - Strukturální vzorec Q

2.2.8 Etylénpropylénový kaučuk (EPDM)

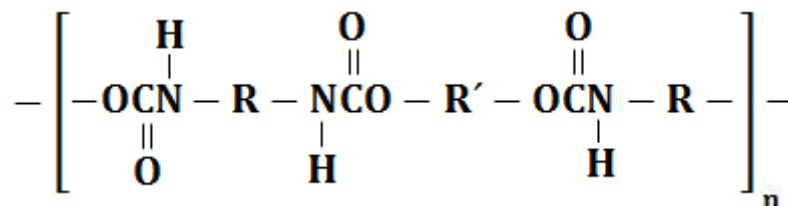
Hlavní předností etylénpropylénového kaučuku je možnost kombinace průměrně dobrých vlastností a nízká cena dostupných monomerů. Jeho nejdůležitější technickou vlastností je výborná odolnost proti stárnutí, proti působení povětrnostních změn a proti účinkům chemických látek. Má malou hustotu a je nebarvící. [8]



Obr. č. 9 - Strukturální vzorec EPDM

2.2.9 Polyuretanový kaučuk (UR, U)

Obecný strukturální vzorec těchto materiálů je znázorněn na (Obr. č. 10). Tyto pryže se vyznačují velkou pevností, dobrou odrazovou pružností a velmi dobrou odolností proti odírání. Jejich nevýhodou je malá odolnost proti zvýšeným teplotám, teplé vodě a páře. [11]



Obr. č. 10 - Strukturální vzorec UR, U

2.3 Všeobecné vlastnosti elastomerů

Tyto materiály se v mnoha směrech liší od klasických konstrukčních materiálů, především kovů a slitin. Elastomery nejsou jen pružné, ale díky své viskoelastické povaze jsou schopny pohlcovat kinetickou energii. V tlaku a smyku vykazují relativně vysokou pevnost. Stejně jako u jiných materiálů může u nich dojít k materiálové únavě a jejich následnému porušení. [5]

Vlastnosti elastomerů, kterými se nejvýrazněji odlišují od klasických materiálů, jsou:

- Mechanické, chemické a dynamické vlastnosti pryží mají relativně velké rozptyly číselných hodnot.
- Pryž je použitelná v relativně úzkém teplotním intervalu.
- Vliv času na všechny její vlastnosti je poměrně velký.

Tyto vlastnosti jsou z hlediska použití nevýhodné. Jsou však víc než vyváženy četnými přednostmi, které učinily z pryže hledaný konstrukční materiál s nejširším uplatněním.

Jsou to zejména:

- Vysoká elasticita (hyperelasticita) – tato vlastnost je dále popsána v kapitole 3.
- Schopnost snášet opakovaně bez poškození značnou deformaci při dlouhé životnosti
- Schopnost tlumení (přeměňovat ve velké míře mechanickou energii v tepelnou)
- Vysoké chemická stabilita, které je možno využívat k ochraně kovů a jiných klasických materiálů proti účinkům koroze.
- Velmi dobré elektroizolační vlastnosti.
- Nepropustnost pro plyny a vodu.
- Vlastnosti pryže lze měnit v širokých mezích nejen skladbou směsí, ale i tvarem výrobku.
- Dynamicky namáhané pryžové dílce nepraskají náhle, nýbrž své vnitřní „stárnutí“ signalizují různými průvodními jevy (např. trhlinkami na povrchu), jež lze pozorovat podstatně dříve.
- Vyznačují se také vlastnostmi, které lze považovat buď za výhodné, nebo za nevýhodné podle konkrétního použití. Jako příklad můžeme uvést tepelnou a teplotní vodivost nebo bobtnání.

Specifické vlastnosti pryže jsou dány chemickým složením a strukturou použitého kaučuku. Kaučuk se skládá z různě dlouhých řetězových molekul, vzniklých polymerací příslušných monomerů. Nutným předpokladem je takové uspořádání řetězců, aby jejich deformace vůbec byla možná a jejich články se mohly otáčet.

Charakter všech elastomerů je dán uspořádáním molekul a jejich vzájemnými reakcemi během deformace. Vlastnosti pryže se dále modifikují vznikem primárních vazeb mezi molekulami, tyto vazby vznikají při vulkanizaci. Kromě toho existují mezi molekulami mezimolekulové neboli sekundární vazebné síly, závislé na teplotě.

Pro elastomery je důležitý tvar distribuční křivky molekulových hmot. Například čím širší je distribuce molekulových hmot (při téže průměrné molekulové hmotě), tím méně je plasticita ovlivňována teplotou. Nízkomolekulární frakce pomalu vulkanizují a ovlivňují tím celý vulkanizační proces. Vysokomolekulární frakce jsou houževnaté a zhoršují zpracovatelnost v operacích před vulkanizací. [5]

Při výběru konkrétní pryže pro určité použití si nevystačíme s údaji základních vlastností, jako jsou tvrdost, pevnost, tažnost, elasticita, strukturální pevnost atd. Je tedy nutné uvést řadu dalších vlastností, jako odolnost proti vlivu prostředí, v němž dílec bude pracovat (světlo, ozón, maziva, nejrůznější chemikálie), odolnost proti dynamickému namáhání (často spolupůsobí i zvýšená teplota), elektrické vlastnosti při střídavém i stejnosměrném proudu (izolační odpor, ztrátový úhel, dielektrická konstanta, závislost na frekvenci) a další. Výběr vhodných vlastností pryže závisí tedy na použití výrobku. [5]

Každý výrobek, součást, konstrukční prvek má určitou životnost. Je nutno si uvědomit, že elastomery jsou makromolekulární látky – termosety, ve kterých probíhají jisté procesy stále i po její vulkanizaci, zejména v závislosti na čase, teplotě a prostředí, po celou dobu jejich existence. Tím je jejich technický život limitován. Vysoká napětí vedou k rychlé změně vlastností a destrukci prvku. Naopak na rychlou změnu odpovídajícího napětí v odpovídajících amplitudách reagují ze všech konstrukčních materiálů nejlépe. [5]

2.4 Gumárenské směsi

Při skladbě směsi je třeba vycházet především z technických požadavků aplikace, pro kterou je daná pryž určena. Musí se přitom zvážit reálné možnosti kaučuku, jeho vlastnosti, možnosti technologického zpracování, výběr přísad z hlediska zpracování a vulkanizačního systému. K těmto závažným hlediskem přistupuje ještě otázka životnosti při používání

výrobků za působení kyslíku, ozónu, tepla a dynamického namáhání. Důležitý je také vztah mezi kaučukem a plnivý. Sladit často protichůdná hlediska, daná z jedné strany technickými požadavky aplikace a ze strany druhé reálnými možnostmi technologie je vždy složitý úkol, jehož řešení je někdy otázkou provozních zkušeností a teoretických znalostí, jindy složitým vývojem a vážným technickým problémem. Kaučuková směs obsahuje zpravidla tyto složky: [5]

- kaučuky,
- vulkanizační činidlo,
- urychlovač vulkanizace,
- aktivátor vulkanizace,
- ochranné látky proti stárnutí a únavě,
- plniva,
- změkčovadla,
- pigmenty,
- nadouvadla.[5]

2.4.1 Kaučuky

Kaučuk je základní složkou, kterou dává směsi i pryži základní charakteristické vlastnosti. Existuje široká škála kaučuků s typickými vlastnostmi, podle nichž volíme vhodný kaučuk pro danou aplikaci. Obsah kaučuku ve směsi může být od 5 až 95 %. Jak již bylo řečeno, kaučuky dělíme na přírodní a syntetické. Druh kaučuku v kaučukové směsi může být jeden, např. přírodní kaučuk, který může být buď jednoho druhu, nebo více druhů (podle čistoty, kvality, dostupnosti, účelnosti atd.). Kaučukové směsi mohou obsahovat i více druhů kaučuků přírodních a syntetických. Nelze vyrábět kaučukové směsi z libovolných typů kaučuků. [5]

2.4.2 Plniva

Základní vlastnosti směsí se upravují plněním a tím se činí vhodnými k použití. Plněním se rozumí přidavek většího množství nejčastěji práškových přísad. Plněním se mění prakticky všechny vlastnosti, jako jsou hustota, tvrdost, modul, elasticita, pevnost, tažnost, strukturální pevnost atd. Upravuje se jím i zpracovatelnost a samozřejmě i cena pryže. [1]

a) aktivní plniva - Ztužující plniva zlepšují fyzikálně mechanické vlastnosti, pevnost, pružnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení. Nejznámější jsou saze, silika.

b) neaktivní plniva - Neztužující plniva zpravidla zvětšují objem, zlevňují výrobek. V praxi se nejčastěji používají kaolin, křída. [7]

2.4.3 Změkčovadla

Změkčovadla zvyšují plasticitu a usnadňují tak mechanické zpracování. Používají se různé minerální oleje. [5]

Ovlivňují v různé míře zpracovatelnost směsí a tím vlastnosti vulkanizátu. Pronikají mezi makromolekuly kaučuku, zvětšují jejich průměrnou vzdálenost, zmenšují propletení, omezují vnitřní tření mezi molekulami a usnadňují tak přeskupování hmoty. Vulkanizát lze pak deformovat menší silou, jsou méně tuhé, mají nižší teplotu křehnutí. Nevýhodou je, že přítomnost změkčovadla zhoršuje mechanické vlastnosti pryže. Zpracovatelností se myslí plasticita, tvarovatelnost a lepivost. [5]

Při vyšším dávkování plniv do směsi dochází již v nevulkanizovaném stavu k takovému ztužení, že by zpracovatelnost byla velmi špatná. Z toho důvodu je třeba do směsi přidávat změkčovadla. Z hlediska takových vlastností nemá rozhodující vliv druh použitého změkčovadla, důležité je především jeho množství. [5] Další důvody pro použití změkčovadel jsou např. zlepšení disperze plniv a přísad, snížení teploty a spotřeby energie při míchání nebo úprava fyzikálních a mechanických vlastností pryže. [5]

Obecně můžeme rozdělit změkčovadla do následujících skupin:

- produkty ropného původu (minerální oleje, parafín, asfalty, vosky),
- produkty zpracování uhelných dehtů (oleje, pryskyřice, smoly),
- produkty zpracování dřeva (smrkový dehet, kalafuna),
- syntetická změkčovadla (estery, kapalné polymery, pryskyřice),
- látky rostlinného a živočišného původu (oleje, tuky, vosky). [5]

2.4.4 Vulkanizační činidla

Vulkanizační činidla sou látky, jejichž působením dochází k zesíťování makromolekul elastomeru, přičemž z elastomeru vzniká pryž, která se svými vlastnostmi podstatně liší od původního elastomeru. Dochází ke změně stavu z převážně plastického do stavu elastického. [11] Vývoj v oblasti nových syntetických kaučuků úzce sledoval i vývoj nových vulkanizačních systémů a zároveň nových vulkanizačních přísad. [9]

Nejpoužívanější vulkanizačním činidlem je síra, dále pak chlorid sirný, organické peroxidy, kysličníky kovů aj. Jako dalšího vulkanizačního činidla lze použít i selénu, telúru, nitrosloučenin, diazosloučenin, chinondioximu, popř. různých dalších látek, které však zatím nemají velký význam. [11]

2.4.5 Urychlovače vulkanizace

Jsou látky, které ve velké míře zkracují dobu vulkanizace, snižují vulkanizační teplotu a zpomalují stárnutí. Tyto látky obsahují v molekule dusík a síru. Jejich účinek je různě velký.[5]

Vulkanizační činidlo umožňuje vulkanizaci a urychlovače a aktivátory upravují její průběh, stupeň a do značné míry i mechanické vlastnosti vulkanizátu. Zvyšují síťovací činnost, čímž umožňují omezit dávkování síry. Organické urychlovače podstatně zkracují vulkanizační dobu a zároveň umožňují snížit vulkanizační teplotu, čímž se spoří energie, ale chrání také jiné složky směsi, jako jsou organická barviva či materiál kombinovaný s kaučukem. Význam urychlovačů vulkanizace spočívá také ve zvýšení efektivnosti vázání síry a tím ve zlepšení užitečných vlastností pryže (tepluvzdornosti, odolnosti proti stárnutí). Spolu se sírou a aktivátory vulkanizace tvoří urychlovače vulkanizační systém. Dále upravují specifické vlastnosti vulkanizátu, jako je modul, pevnost, odolnost proti opotřebení, stárnutí. [5]

2.4.6 Retardéry vulkanizace

Použití retardérů vulkanizace je nezbytné pro směsi obsahující vysoce aktivní vulkanizační přísady nebo urychlovače vulkanizace, mají-li se takové směsi zpracovávat při vyšších teplotách. Retardéry chrání směs před předčasným navulkanizováním při míchání a dalším zpracování. Retardéry dělíme na: [5]

- anorganické (MgO, PbO),
- organické (octan sodný, kalafuna, kyselina sebaková). [5]

2.4.7 Antioxidanty, antiozonanty

I po vulkanizaci zůstávají v zesíťovaném polymeru dvojně vazby, které jsou napadány kyslíkem a ozonem. Obsah ozonu ve vzduchu sice není velký, ale je mnohem agresivnější než kyslík. Vznikají nestabilní peroxidy nebo ozonidy, které se radikálově štěpí a tak dochází k

narušení struktury - stárnutí pryže. Tento proces výrazně zpomalují látky zvané antioxidanty a antiozonanty. [5] Tyto látky je možno rozdělit do těchto hlavních skupin:

- antioxidanty a antiozonanty (nejdůležitější),
- činidla chránící proti účinkům světla (UV absorbéry),
- ochranné vosky,
- přísady potlačující hydrolyzu funkčních skupin,
- akceptory rozkladných produktů. [5]

2.4.8 Nadouvadla

Pro výrobu lehčené pryže se používá různých druhů nadouvadla, což jsou látky, které se při vyšších teplotách v průběhu vulkanizace rozkládají za vzniku většího objemu plynů. Teplota rozkladu a objem plynů závisí především na druhu použitého nadouvadla. Teplotu rozkladu je možno dále ovlivnit přísadami, které působí jako aktivátory rozkladu nadouvadla. Kautčukové směsi musí mít vysokou plasticitu a určitý průběh vulkanizace, aby nadouvání proběhlo v požadovaném rozsahu. [5]

2.4.9 Pigmenty, barviva

Používají se k vybarvení směsí do různých odstínů. Původně byly pouze minerální pigmenty, které umožňovaly jen omezený rozsah barevných odstínů. Zavedením organických pigmentů necitlivých k vulkanizační teplotě a síře se možnosti vybarvování pryže rozšířily a zvýšila se účinnost vybarvování. Z toho důvodu moderní organické pigmenty, přestože jsou dražší, postupně vytlačují anorganické pigmenty. U bílých nebo světlých se musí použít elastomerů a antioxidantů na světle nebarvících. Jako základního pigmentu se používá litoponu, titanové běloby, řidčeji zinkové běloby, která je drahá a stopy olova v ní obsaženého způsobují při vulkanizaci zšednutí. [5]

2.5 Plastikace kaučuku

V průběhu plastikace se snižuje molekulová hmotnost kaučuku, což umožňuje a zlepšuje průběh dalších technologických operací. Plastikaci je třeba vést jen do takového stupně, kterého je nevyhnutelně třeba pro úspěšné zpracování. Nadměrnou plastikací se zhoršují mechanické vlastnosti vulkanizátů a zhoršuje se i odolnost proti únavě a stárnutí.

Plastikace provádíme na dvouválci, v hnětiči nebo ve šnekovém plastikačním stroji. Tato operace vyžaduje značné množství energie, nákladné strojní zařízení, velký počet pracov-

ních sil. Řešením jak odstranit tyto nároky je zpracovávat kaučuky regulované při polymeraci tak, aby byly přímo zpracovatelné či maximálně zkrátit dobu plastikace. To je umožněno zavedením plastikačních činidel. [5]

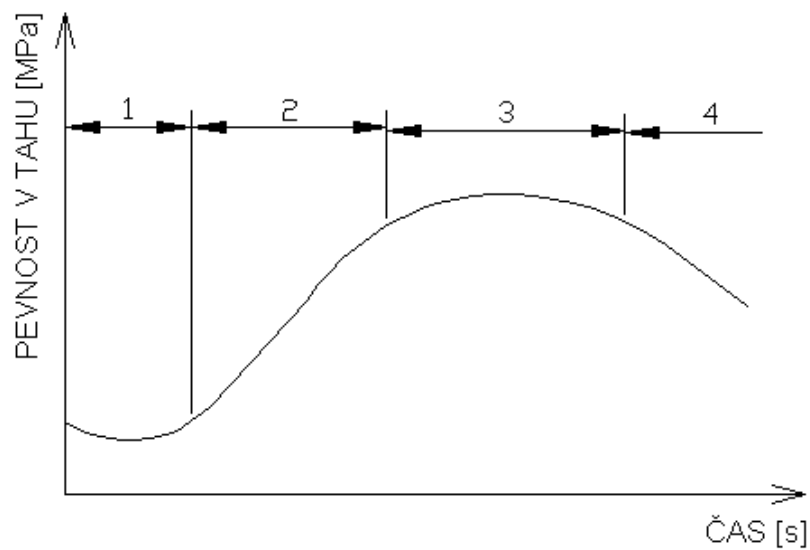
2.6 Vulkanizace

Vulkanizace kaučukové směsi je fyzikálně-chemický proces, při kterém za působení teploty a tlaku po určitý časový interval se kaučuková směs mění na vulkanizát. Během vulkanizace vznikají v kaučukové směsi pevné chemické vazby mezi jednotlivými řetězovými molekulami za pomoci vulkanizačních činidel. To znamená, že v látce, která má charakter převážně plastický, působením fyzikálních sil za dodání tepla po danou dobu dojde chemickým změnám, kdy látka změní svůj charakter na převážně elastický. Látka si zachovává tvar, ve kterém proces vulkanizace proběhl. Výsledný materiálový produkt se nazývá vulkanizát. [5]

Vulkanizace kaučukové směsi probíhá v předem stanovených podmínkách teploty tlaku a času, nejčastěji ve vulkanizačních formách. Vulkanizace elastomerní směsi ve formách neprobíhá v celém objemu, zejména u silnostěnných výrobků ve stejném čase díky špatné vodivosti elastomerní směsi. Vlastnosti výrobku jsou pak ovlivněny vlastnostmi směsi, vulkanizačními podmínkami, jeho tvarem a rozměry a použitou výrobní technologií. [5]

Při průmyslovém využití vulkanizace je třeba dosáhnout patřičného zesíťování co nejrychleji, aby se plně využilo zařízení gumárenských závodů, ale zároveň je nutno brát zřetel i na jakost výrobků a na bezpečné zpracování směsi.

Průběh vulkanizace z hlediska času je znázorněn na tzv. vulkanizačních křivkách (*Obr. č. 11*). V grafu jsou znázorněny jednotlivé časové úseky vulkanizačního procesu, bezpečnost směsi, síťování a reverze. V souvislosti s tím je třeba zmínit se ještě o jedné důležité hodnotě, totiž optimu vulkanizace. [2]



Obr. č. 11 - Vulkanizační křivka

Na (Obr. č. 11) jsou znázorněny tyto časové úseky:

1. Bezpečnost směsi - proti navulkanizování je časový úsek, v němž vlastní síťovací reakce při tepelném zatížení ještě neprobíhá. V praxi lze v této době zpracovávat směsi na polotovary (mícháním, válcováním, vytlačováním). V první fázi lisování je tečení kaučkové směsi dokonalé a dochází k vyplnění všech prostorů lisovací formy.

2. Vlastní síťovací reakce - je proces, při kterém se vytvářejí příčné chemické vazby a dochází tak k trojrozměrnému zesítnění kaučuku. Rychlost a průběh síťovací reakce se vyhodnocuje na přístrojích zvaných vulkametry.

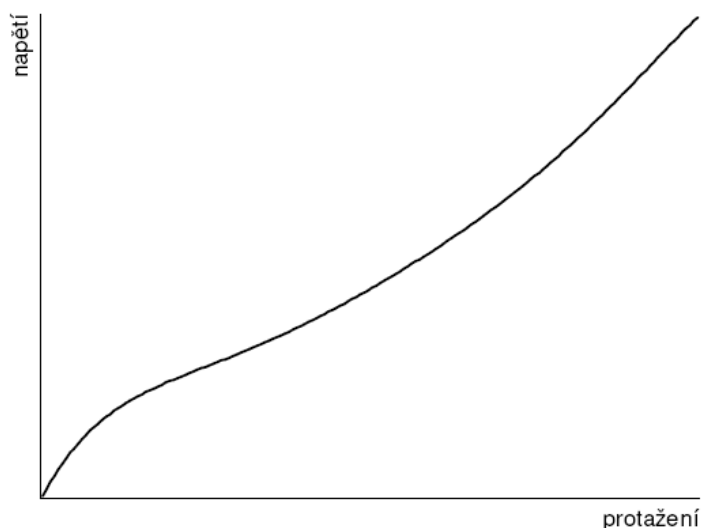
3. Optimum vulkanizace - je doba, kdy jsou vlastnosti vulkanizátu optimální. Úsek, ve kterém se tyto vlastnosti nemění, označujeme jako vulkanizační plató.

4. Reverze - je jev, který v pryži nastává při dalším působení tepla po dosažení optima vulkanizace. Spočívá v destrukci vazeb, poklesu relativní molekulové hmotnosti a zhoršování fyzikálních vlastností. Jde tedy o jev nežádoucí, kterému se v praxi snažíme zabránit. [2]

3 HYPERELASTICITA

Elastomery se vyznačují některými charakteristickými rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních materiálů (ideálně elastických). Souhrn těchto vlastností je často označován jako hyperelastická a tyto materiály pak považujeme za hyperelastické. Hlavními znaky hyperelasticity jsou:

- Dosažitelné elastické (vratné) deformace jsou veliké, mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika set procent původní délky.
- Závislost napětí na deformaci je silně nelineární. Tvar této závislosti má zpravidla charakteristický esovitý průběh (*Obr. č. 12*).
- Materiál se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je asi desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek.
- Objemová tuhost většiny elastomeru je velmi vysoká. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa a s uvažováním předchozího bodu (tj. malého poměru napětí ku deformaci) se pak Poissonův poměr blíží hodnotě 0,5 (v závislosti na obsahu plniv). To znamená, že většinu těchto materiálů lze považovat za objemově nestlačitelné. [4]



Obr. č. 12 - Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomeru [4]

Elastické deformační přeměny u elastomerních materiálů probíhají s určitým zpožděním, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování pryže má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se ozna-

čuje jako viskoelastické chování. Je zřejmé, že pro použití Hookeova zákona nejsou splněny dvě základní podmínky: závislost deformace na napětí není lineární a dochází k velkým deformacím ($> 2\%$). Přesto je tento vztah s dostatečnou přesností použitelný v aplikacích, kde se nepředpokládají velké deformace zatěžovaného prvku. Pro přesné výpočty a pro případy větších deformací je nutno použít nelineární popis závislosti napětí-deformace. [4] Tento popis umožňují hyperelastické modely.

3.1 Hyperelastické modely

Jednotlivé hyperelastické modely se liší definicí funkce hustoty deformační energie W . Část hyperelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů (např. Neo-Hookean, Arruda-Boyce). Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam. Další skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby model co nejlépe aproximoval tato pozorování. Takové modely (např. Polynomický, Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Gent) jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam.

Níže jsou uvedeny dnes nejpoužívanější tvary funkce W , které jsou většinou pojmenovány po svých autorech. [4]

3.1.1 Polynomická funkce

Polynomická forma je založena na prvním a druhém deformačním invariantu (I_1, I_2). Jde o model, jenž má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (1)$$

kde c_{ij} jsou materiálové konstanty a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Tato forma může být aplikována pro deformaci dosahující až 300 %. [4]

3.1.2 Neo-Hookean

Model Neo-Hookean patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Je možné ho brát, jako podmnožinu polynomické formy pro $N = 1$, $c_{01} = 0$, $c_{10} = \mu / 2$. Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomeru. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci. [4]

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (2)$$

kde μ je počáteční smykový modul.

$$\mu = nkT \quad (3)$$

kde n je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota. Model je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání. [4]

3.1.3 Yeoh

Model Yeoh je podobný polynomické formě, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Jeho výhodou je naopak jeho jednoduchost. Je definován jako: [4]

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (4)$$

kde c_{i0} je materiálová konstanta a za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3. Pokud $N = 1$ jde o model Neo-Hookean.

Yeoh model je obvykle uvažován s $N = 3$. Tří-parametrový Yeoh model obecně poskytuje dobré výsledky pro deformace velkého rozsahu i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty deformace. [4]

3.1.4 Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. stol. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů. [4]

Používají se dvou, tří, pěti a devíti-parametrové Mooney-Rivlin modely, které také můžeme považovat za speciální případy polynomické formy. [4]

- Dvou-parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Je ekvivalentní polynomické formě s $N = 1$:

$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3) \quad (5)$$

kde c_{10} , c_{01} jsou materiálové konstanty.

- Tří-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$

$$W = c_{10} (I_1 - 3) + c_{01} (I_2 - 3) + c_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (6)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} jsou materiálové konstanty.

- Pěti-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 2$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (7)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} jsou materiálové konstanty.

- Devíti-parametrový model je shodný s polynomickou formou pro $N = 3$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \quad (8)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} , c_{03} jsou materiálové konstanty.

Dvou-parametrový model je využíván do 90-100 % tahové deformace, ale nemusí být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení. Pěti nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro deformace až do 300 %.

3.1.5 Arruda-Boyce

Arruda-Boyce je model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. Arruda-Boyce může být uvažován jako rozšíření modelu Yeoh pro $N = 5$, kde konstanty mají reálný význam. [4]

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3)^i \quad (9)$$

kde C_i jsou konstanty, μ je počáteční smykový modul (stejně jako u modelu Neo-Hookean) a λ_L je tzv. "limitní protažení" sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, při kterém už se síť dál neprotahuje a napětí se začíná blížit nekonečnu. Jestliže se λ_L rovná nekonečnu, forma Arruda-Boyce přechází na Neo-Hookean. Model je vhodný pro deformaci do 300 %. [4]

3.1.6 Gent

Gentův model je podobný formulačně složitějšímu modelu Arruda-Boyce, jelikož také užívá konceptu limitního síťového protažení, nevychází však z modelu vnitřní struktury elastomerů. [4]

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln \left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m} \right) \quad (10)$$

kde E je počáteční modul pružnosti, který je pro nestlačitelné materiály 3μ . I_m je limitní hodnota členu $(I_1 - 3)$, analogická k λ_L v Arruda-Boyce modelu. Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu Yeoh. Jestliže se I_m bude rovnat nekonečnu, model opět přejde na formu Neo-Hookean. Výhody modelu spočívají v jeho jednoduchosti (pouze dvě materiálové konstanty) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťové deformační odezvy. [4]

3.1.7 Ogden

Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. Tento model je dnes široce používaný a poměrně dobře vystihuje chování elastomeru i při velkých deformacích. [4]

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (11)$$

kde μ_i a α_i jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu (μ_i mají však obecně význam počáteční tuhosti). Za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Pro $N = 1$ a $\alpha_i = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu Neo-Hookean. Pro $N = 2$, $\alpha_i = 2$ a $\alpha_i = -2$ Ogden přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. Ogden může být obecně aplikován pro deformaci do 700 %. [4]

Výše uvedené vztahy jsou v důsledku předpokládané objemové nestlačitelnosti elastomerů nezávislé na třetím invariantu I_3 pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. Pro případné zahrnutí objemové stlačitelnosti "téměř nestlačitelných" elastomerů je funkce W doplněna o aditivní člen W_{vol} závislý na I_3 (respektive poměrné objemové deformaci J, pro kterou platí $I_3 = J^2$) a objemovém modulu K. Níže je stručný přehled tvaru W_{vol} používaných v uvedených modelech: [4]

$$W_{vol} = \frac{K}{2} (J - 1)^2 \quad (12)$$

$$W_{vol} = \frac{K}{4} ((J - 1)^2 (\ln J)^2) \quad (13)$$

$$W_{vol} = K(J \ln J - J + 1) \quad (14)$$

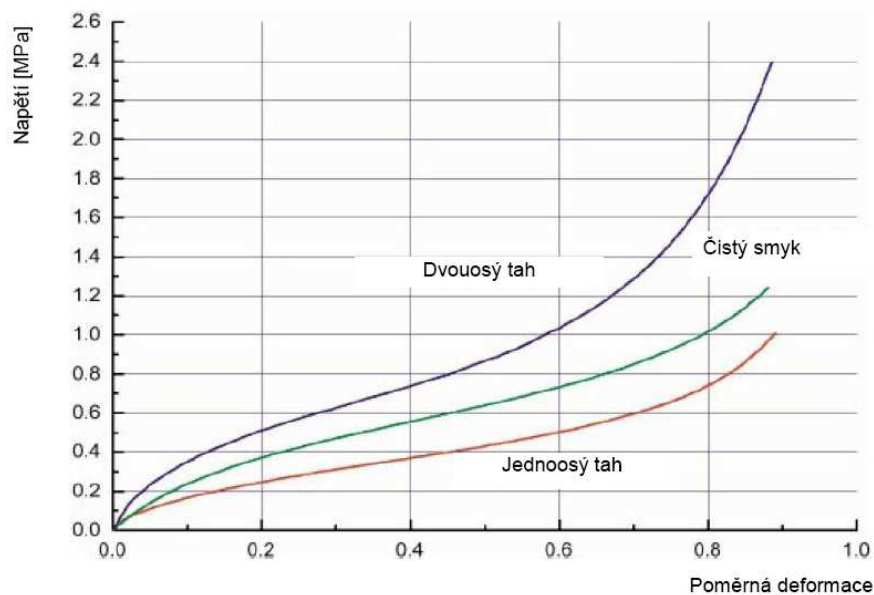
$$W_{vol} = \frac{9K}{2} \left(J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \quad (15)$$

$$W_{vol} = \frac{K}{2} \left(\frac{J-1}{2} - \ln J \right) \quad (16)$$

3.2 Stanovení materiálových konstant

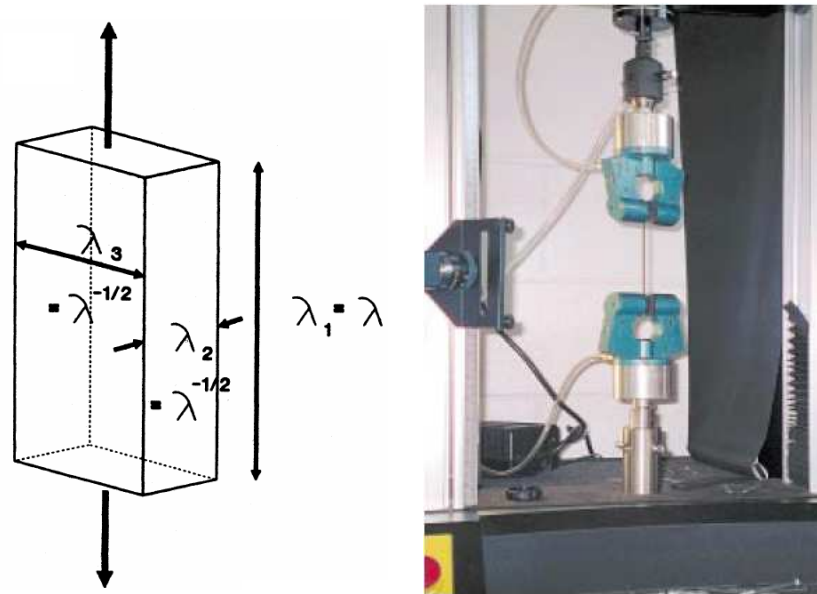
Jednoduché lineární modely jsou založeny na modulu pružnosti a Poissonově konstantě. Tyto parametry lze stanovit poměrně jednoduše na standardních sériově vyráběných zařízeních. Avšak, pro stanovení materiálových konstant nelineárních hyperplastických modelů je nutno v materiálu dosáhnout i dalších módu namáhání. Pro tento způsob zatížení jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení. [4]

Abychom získali přesné parametry do hyperelastických modelů musíme materiál zkoušet v jednoosém tahu, dvouosém tahu a čistém smyku (*Obr. č. 13*). Vzhledem k různorodosti elastomerů je nutné pro každou konkrétní analýzu přesně stanovit materiálové konstanty daného materiálu. Požadovaným výstupem z testů je vždy celá křivka závislosti napětí/deformace pro daný způsob zatěžování. [4]



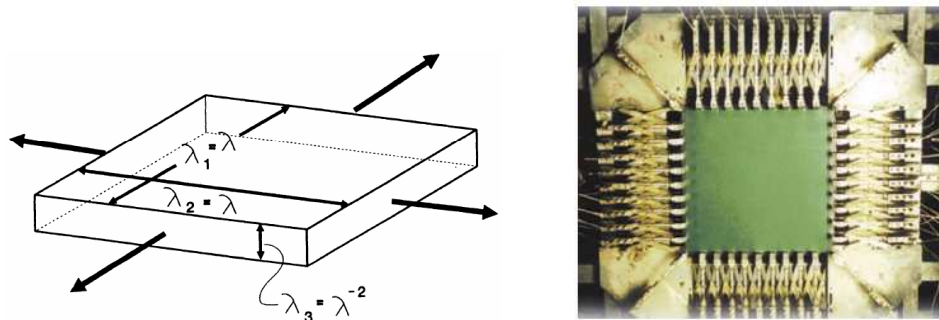
Obr. č. 13 - Příklad chování konkrétního elastomeru v jednotlivých módech zatěžování [1][7]

Jednoosý tah lze testovat na univerzálních zkušebních strojích. V tomto případě je vzorek materiálu roztahován ve směru jediné osy. Tímto způsobem namáhání se dále zabývá podkapitola 6.1.

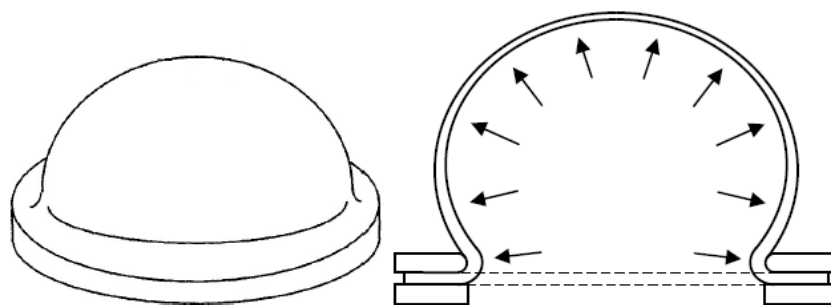


Obr. č. 14 - Jednosý tah [7]

Při dvousém zatížení je nutno plochý vzorek materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny (dohází k tomu např. při nafukování míče). Tohoto stavu lze dosáhnout několika způsoby, již zmíněním vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem (Obr. č. 16), roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů (Obr. č. 15) nebo roztahováním kruhového vzorku radiálně ve směru od středu.

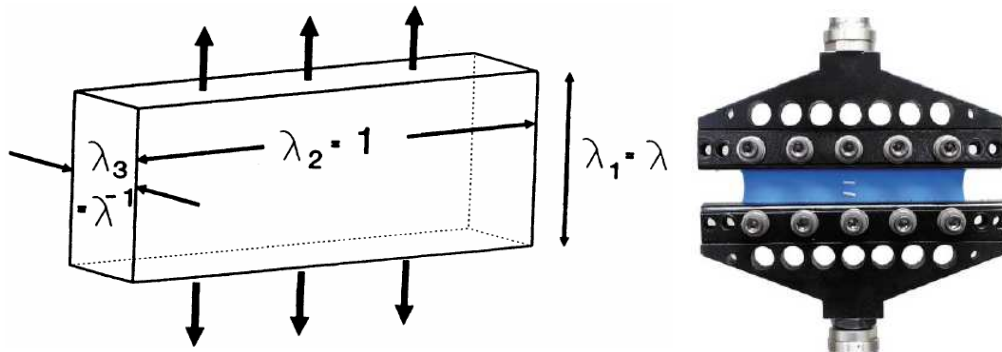


Obr. č. 15 - Dvousý tah [7]



Obr. č. 16 - Metoda dvousého tahu pomocí nafouknutí vzorků [7]

Čistého smyku lze v tělese dosáhnout natahováním podélného vzorku, jehož výška je alespoň 10x menší než jeho šířka. Tento případ je znázorněn na (Obr. č. 18).



Obr. č. 17 - Čistý smyk [7]

4 KONSTRUKCE PRYŽOVÝCH VÝROBKŮ

Správně konstruovaná součást z pryže musí nejen vyhovovat všem technickým požadavkům kladeným na její funkci ve stroji a v provozu, ale musí se i dobře, tj. co nejjednodušeji, vyrábět. Dále je třeba již při navrhování součásti dbát, aby spotřeba surovin na její výrobu byla co nejmenší a aby nevznikaly zmetky proto, že její konstrukce neodpovídá zásadám gumárenských technologických postupů. [2]

Při navrhování nových tvarů pryžových výrobků se musí přihlížet k tomu, že pryž v napnutém stavu mnohem dříve stárne působením světla a kyslíku, a volit takový tvar, jaký má mít výrobek při použití.

Předem je nutno se přesvědčit v katalogích nebo normách, zda již stejný nebo tvarově podobný výrobek nebyl typizován nebo normalizován. V kladném případě se musí konstrukce finálního výrobku volit tak, aby se mohlo použít standardního výrobku. [2]

Aby konstrukce byla technologicky vhodná, je nutné:

- a) volit nejjednodušší tvary,
- b) tvar upravit tak, aby součásti měly co nejmenší hmotnost při zachování potřebné pevnosti a dalších mechanických a dynamických vlastností,
- c) volit takovou konstrukci, aby nevznikaly zmetky převulkanizováním nebo nedovulkanizováním rozdílných průřezů,
- d) u gumo-kovových součástí upravit plochy kovových dílů tak, aby byla zaručena vyrobiteľnosť i správna funkce výrobku,
- e) omezit na nejmenší míru potřebu dokončovacích prací. [2]

4.1 Tloušťka stěny pryžových výrobků

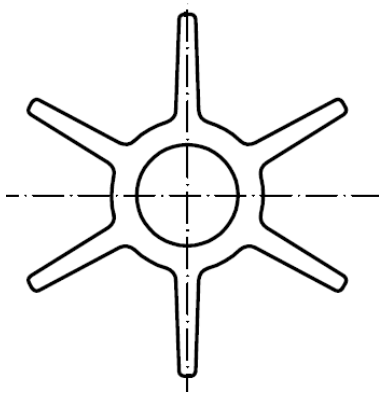
Stejnóměrnosti základních vlastností pryže v různých místech výstřiku lze dosáhnout jen tehdy, je-li tloušťka všech průřezů stejná. Vulkanizace pak probíhá stejnoměrně a výroba je hospodárná. Tato zásada se má dodržovat při konstrukci výstřihů z měkké pryže a je nezbytné ji dodržet při navrhování tvarů z tvrdé pryže. [7]

Gumárenská směs je v zásadě špatným vodičem tepla. Získání dobrého vulkanizátu závisí na stejnoměrném prohřátí gumárenské směsi v celém průřezu. Tyto dvě okolnosti omezují rozsah tloušťky průřezu výstřiků při vulkanizaci. Tělesa s otvory menšími než 30 mm mu-

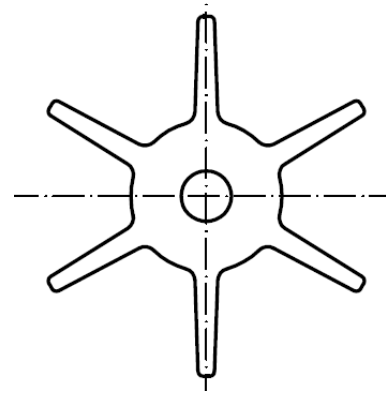
síme považovat za výstřiky plné. Je-li jádro vyhřívané, můžeme používat i větších otvorů. [7]

4.1.1 Přechody a různé tloušťky stěn

Kvůli konstrukčním důvodům nemůžeme často dodržet stejnou tloušťku průřezu. V těchto případech musíme používat pozvolných přechodů mezi těmito různými průřezy. Při napojování několika stěn, kde je výstřik tlustější, musíme konstrukci upravit tak, aby tloušťka tohoto průřezu nebyla příliš rozdílná. Z této rozdílnosti tlouštěk plyne možnost vzniku trhlin, v důsledku nestejnomyerného smršťování. [7]



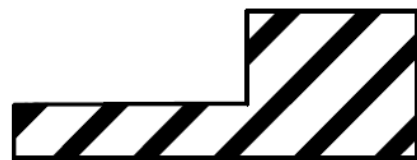
Obr. č. 18 - Správně - tloušťka stěn je stejnoměrná, přechody pozvolné



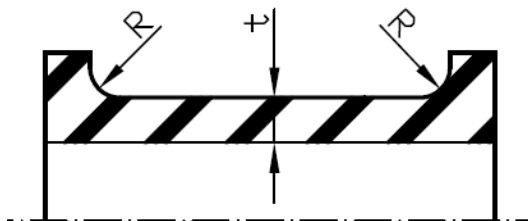
Obr. č. 19 - Špatně - rozdílná tloušťka stěn, náhlý přechod



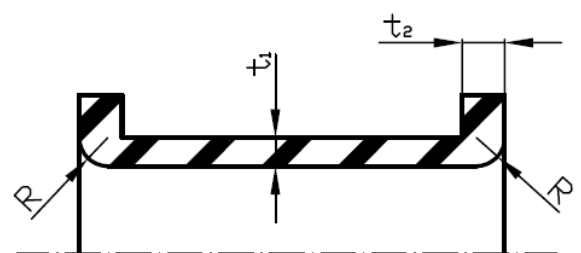
Obr. č. 20 - Správně - přechod je pozvolný



Obr. č. 21 - Špatně - náhlý přechod



Obr. č. 22 - Správně - stejnoměrná tloušťka stěn, přechody zaobleny

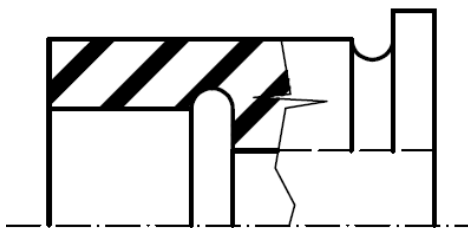


Obr. č. 23 - Špatně - nestejná tloušťka stěn, nevhodně zaoblený přechod

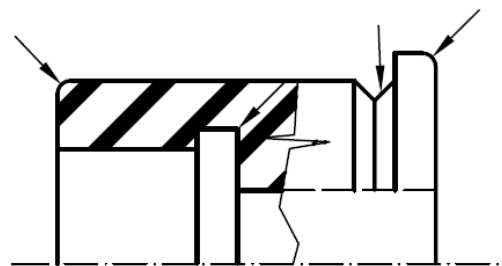
4.2 Zaoblení hran

Ostré hrany, kouty, zářezy a vruby mají nepříznivý vliv na životnost pryžového výrobku. V ostrých hranách a zářezech se zvětšuje napětí vláken, takže rychleji podléhají únavě. Kouty a hrany musí být zaoblené a součást má mít přibližně proudnicový tvar. Tím se zvětší mechanická pevnost výrobku, usnadňuje se tečení kaučukové směsi, předchází se vzniku zmetků a zlepšuje vzhled výrobku.

Zaoblení se má dělat v oblouku o poloměru nejméně $R = 1$ mm. U dynamicky namáhaných součástí má být poloměr zaoblení ještě větší. Platí zásada, že čím větší jsou poloměry zaoblení, tím stejnoměrnějšího zatížení všech povrchových vláken se dosáhne a tím méně trhlin vznikne. Nedoporučuje se však zaoblovat hrany, které jsou v dělicí rovině, protože to zdražuje výrobu formy a znesnadňuje vytahování vylisku z formy, čímž se výroba rovněž zdražuje. Příklad správného a špatného zaoblení hran je uveden (Obr. č. 24, 25). [2]



Obr. č. 24 - Správně, hrany jsou zaobleny



Obr. č. 25 - Špatně - hrany jsou ostré a výrobek obsahuje zářezy

4.3 Okraje pryžových výrobků

Okraje tenkostěnných výrobků z pryže mají být pokud možno zesílené. Za prvé se tím chrání okraj proti roztržení (vzhledem k malé strukturální pevnosti pryže dochází po nepatrném narušení okraje k postupnému trhání i působením malých sil) a zadruhé se takový okraj nemůže zaměnit s přetokem, který se odděluje od výstřiku. [7]



Obr. č. 26 - Správně - tenký okraj je vyztužen [7]

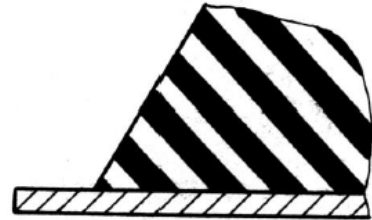


Obr. č. 27 - Špatně, tenký okraj může být zaměněn s přetokem [7]

U pryžových výrobků může nevhodně ukončený okraj pryže způsobit vážné poruchy v provozu. Při namáhání pryžo-kovových prvků jsou zpravidla nejvíce namáhána okrajová a povrchová vlákna. Proto musí být zakončení takové, aby se v pryži nekonzentrovalo napětí. [7]



Obr. č. 28 - Správně - okrajová vlákna jsou odlehčena [7]



Obr. č. 29 - Špatně, při zatížení se pryž v okrajích snadno odtrhne [7]

4.4 Výrobky z měkké pryže

Dobrá tažnost a pružnost u měkkých pryží (do tvrdosti 80 Shore) umožňuje zhotovovat v jednoduché formě i složitější tvary a zároveň se výstřík vyjímá z formy poměrně snadno. Tato vlastnost měkké pryže však nesmí svádět k tomu, aby konstruktér navrhoval tvary příliš složité, kde by byl při vytahování z formy násilně přetahován velký průřez výstříku malým otvorem formy nebo malým otvorem ve výrobku velký průřez jádra. [7]

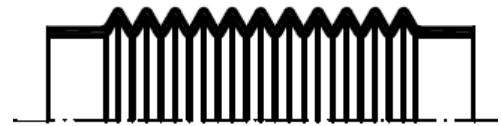
Tyto závislosti se velice těžko dají vyčíslit konkrétně. Vodítkem pro určení rozdílu mezi průřezem trnu a otvorem výrobku a obráceně musí být tažnost použité pryže. Maximální rozdíl smí být takový, že při vytahování se pryž může deformovat (protáhne se asi na 1/4 až 1/3 protažení při přetržení) o:

- 130 – 200% u pryže málo plněné, mající tvrdost do 50 Shore
- 75 – 120% u pryže plněné, o tvrdosti do 80 Shore
- 50 – 100% u pryže olejivzdorné

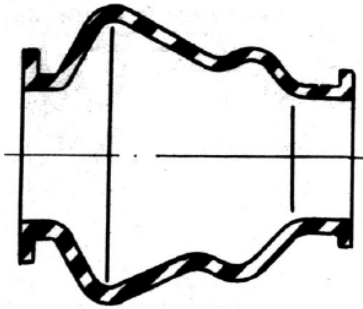
Menší protažení je nutno brát vždy pro větší tvrdost. Otvor v pryžovém výrobku, kterým má být jádro protahováno musí být hladké bez zářezů a ostrých koutů. Správná a nesprávná konstrukce je znázorněna na obrázcích. [7]



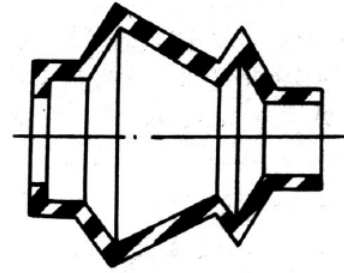
Obr. č. 30 - Správně - ochranný měch je kuželový



Obr. č. 31 - Špatně, ochranný měch je válcový, obtížně se snímá z jádra při výrobě



Obr. č. 32 - Správně, hrany jsou zaobleny, uchycení je provedeno zvenčí [7]



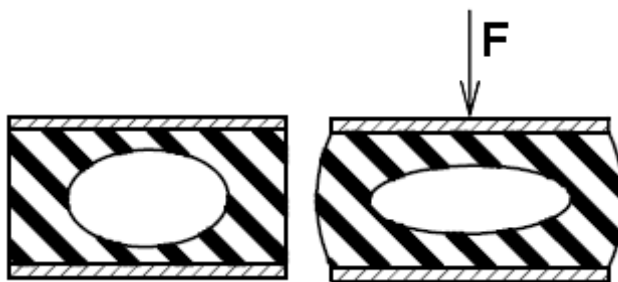
Obr. č. 33 - Špatně, ostré hrany, uchycením součásti je zvětšen vnitřní průměr [7]

4.5 Otvory

V pryžových součástech je možné vyrobít při tváření pomocí trnů díry různých průřezů. Při tváření gumárenské směsi je trn (jádro) při lisování namáhán značným tlakem, který musí být řízen tak, aby se trn nevychýlil z předepsané polohy. Pro bezpečnou výrobu otvorů platí tyto zásady: [2][7]

- u průchozích otvorů, u nichž je trn podepřen na dvou stranách, má být průměr $D = 0,2$ délky otvoru, nejméně však 1 mm a tloušťka stěny mezi otvory má být nejméně 2 mm.
- u slepých otvorů, kde je trn uchycen letmo, platí $D = 0,4$ délky otvoru, nejméně však 1 mm, tloušťka stěny mezi otvory má být minimálně 2mm

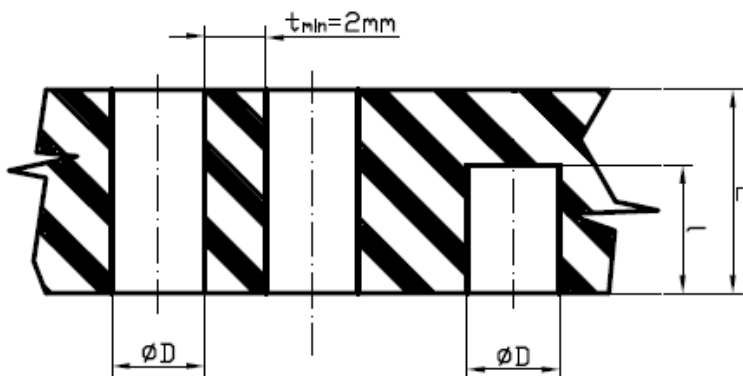
u výrobků s většími dutinami, než je uvedeno v předchozím bodu, musí být stěny tlustší, protože jinak by se trn tlakem a tokem gumárenské směsi vychýlil ze své osy. [2][7]



Obr. č. 34 - Správně - Otvor nemá ostré kouty



Obr. č. 35 - Špatně - v ostrých koutech při deformaci pružiny dochází ke koncentraci napětí



Obr. č. 36 - Otvory v pryžových výrobcích

4.6 Konstrukční řešení forem

Formy slouží k výrobě mnoha různých výrobků. Jejich řešení ovlivňuje celá řada faktorů (především druh zpracovávaného materiálu, zvolený výrobní postup a použité strojní zařízení) na základě kterých zavádíme hlediska třídění forem. [7]

Dle druhu zpracovávaného materiálu:

- pro zpracování reaktoplastů
- pro zpracování termoplastů
- pro zpracování gumárenských směsí

dle výrobní technologie:

- a) lisovací
- b) přetlačování
- c) vstřikovací
- d) lící
- e) vyfukovací
- f) tvarovací
- g) máčecí
- h) spékací

z hlediska strojního zařízení:

- a) upínací – upnutá forma na stroji tvoří s ním jeden celek při všech operacích
- b) snímací – ze stroje (lisu) se forma vyjímá při dílčích operacích (např. vyjímání vylisku, čištění formy, plnění dutin).

dle násobnosti formy (počet dutin):

- a) etážové – dutiny ve formě pro jednotlivé vylisky jsou umístěny ve dvou či více dělicích rovinách nad sebou
- b) dělené – tvárník nebo tvárnice jsou složeny ze dvou nebo více pohyblivých dílů pro snadnější vyjmutí výrobku.
- c) kombinované – mají různé dutiny a umožňují vyrábět současně tvarově rozdílné dílce, zpravidla slouží ke kompletaci finálního výrobku. Výhodou je snazší organizace při kompletaci výrobku, dodržení barevných odstínů. Nevýhodou může být obtížné dosažení optimálního výkonu formy. [7]

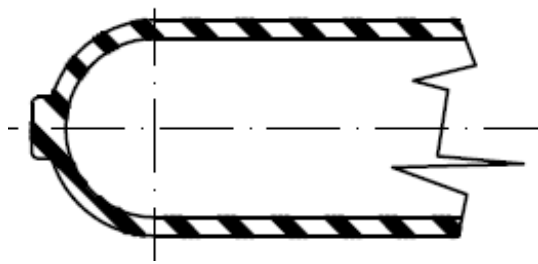
4.7 Umístění dělicí roviny formy

Dělicí rovina dělí tvářecí prostor vulkanizační formy na dva nebo více dílů a je vytvořena dosednutím dvou částí formy při působení vnějšího tlaku na formu. V místech dělicí roviny jsou na dílech formy vytvořeny dosedací plochy 5 až 8 mm široké, ukončené přetokovými drážkami. V místech dělicí roviny zůstávají na vylisku švy a přetoky. Umístění dělicí roviny určují technici gumárenských závodů při navrhování vulkanizační formy. Podle tvaru

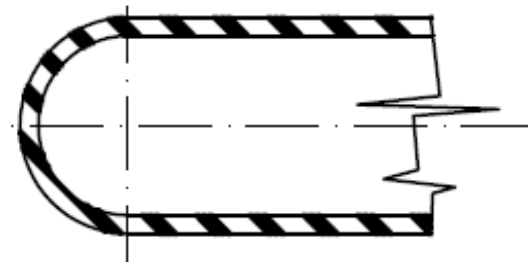
výrobku a užitého materiálu se volí zpravidla jedna nebo dvě, u tvarově zvláště složitých výrobků tři i více dělicích rovin. Jejich poloha se volí se zřetelem na tyto požadavky:

- a) aby se výrobek dal z formy snadno vyjmout,
- b) aby dělicí rovina nebyla na dosedacích těsnicích plochách nebo v místech velkého namáhání krajních vláken,
- c) dělicí rovina nemá být v tvarově složitě rovině výlisku, kde je opracování švů a odstraňování přetoků pracné,
- d) dělicí rovina musí být volena tak, aby při stlačení gumárenská směs vytlačila vzduch a zaplnila dutinu formy.

Správné navržení dělicí roviny je jednou z nejdůležitějších prací při návrhu formy a lze jím ovlivnit hospodárnost výroby lisovaných pryžových výrobků. Obecně platí, že tvarově jednoduchý výrobek znamená jednoduchou formu, snadný technologický postup a tedy i levný výrobek. [2]



Obr. č. 37 - Správně – v místě dělicí roviny je stěna tlustší



Obr. č. 38 - Špatně – V místě dělicí roviny může dojít k poškození stěny při odstraňování přetoku

5 PRYŽOVÉ TĚSNĚNÍ

Pryžovým těsněním lze utěsnit prostor tak, aby do něho nevnikal nebo z něho neunikal vzduch, voda, olej, mazivo, benzín, roztoky kyselin a dalších nežádoucích látek. Účinnost těsnění je podmíněna použitím správného druhu těsnění a jeho uložením. [9] Pro těsnění platí následující všeobecná zásada (bez zřetele na vnější tvar těsnění a na další požadavky kladené na jednotlivé druhy těsnění): Kromě chemické odolnosti a mechanické pevnosti musí mít těsnění tu vlastnost, aby předpětím vyvolaná síla zaručovala jeho těsnost přetvořením jeho tvaru. Tato síla nesmí příliš rychle klesat s časem (v důsledku únavy materiálu). V převážné většině případů je těsnění nejměkčím členem příslušného celku. Požaduje se, aby těsnění reagovalo na malé pohyby a protažení napínacího zařízení bez větší újmy na těsnících schopnostech. To ovšem vyžaduje, aby těsnění při předpětí mělo i místo pro deformaci. Ze všech stran uzavřené těsnění nemůže být při předpětí vhodně formováno, nemůže akumulovat žádnou energii, a tedy ani žádnou energii vracet. Při malých pohybech a dilatacích v místě upnutí nemůže dobře těsnit. [3]

Podle druhu materiálu a konstrukce je těsnění sestaveno do těchto skupin: [9]

1. Přírubové těsnění:

- a) vysekávané z desek,
- b) lisované.

2. Kroužkové těsnění:

- a) lisované,
- b) řezané,
- c) slepované.

3. Zavařovací kroužky.

4. Nevulkanizované těsnění:

- a) kroužky,
- b) tmely.

5. Stříkané těsnění:

- a) šňůrové,
- b) profilové,

- c) polepované,
- d) rámové.

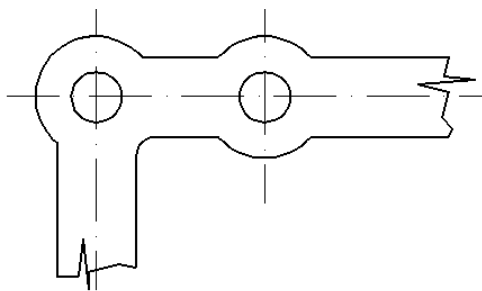
6. Ucpávky.

8. Hřídelové těsnění.

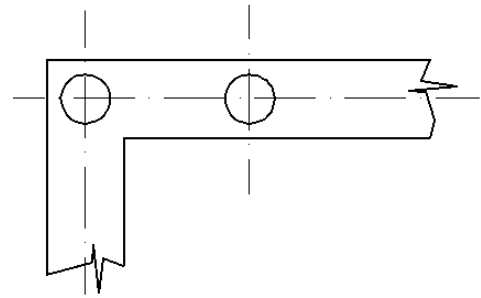
7. Manžety.

9. Ochranné kryty.

Přírubové těsnění - Pro utěsnění neobrobených nebo jen hrubovaných ploch se nemá používat těsnění tenčího než 3 mm a pro obrobené plochy tenčího než 1 mm. Těsnění do tloušťky 3 mm je výhodnější vysekávat z desek, těsnění nad 3 mm tloušťky se má spíše lisovat. Těsnění nesmí být zeslabeno otvory a kolem otvorů musí být rozšířeno. Průměr díry má být asi o 10 % větší než průměr čepu nebo šroubu. Rohy mají být zaobleny. [2]

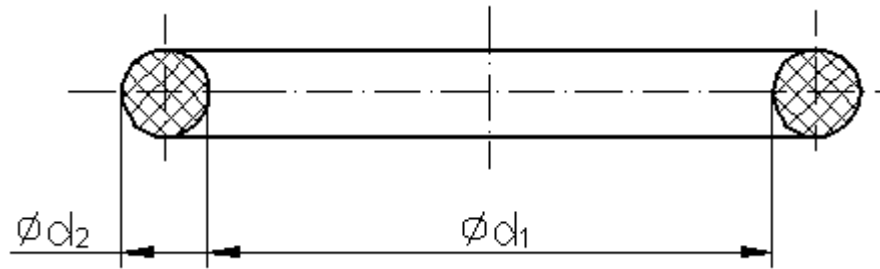


Obr. č. 39 - Správně – Těsnění je v místě otvorů rozšířeno

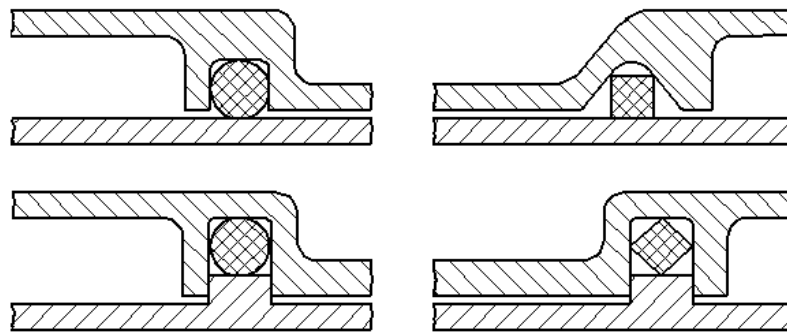


Obr. č. 40 - Špatně – zeslabené těsnění v místě otvorů

Kroužkové těsnění - Pro utěsnění přírub a vík. Lisovaného těsnění se má použít jedině s kruhovým průřezem. Uložení kroužků závisí na tlacích, proti nimž mají těsnit. Pro nižší tlaky mohou být volně uloženy, pro vyšší je nutno kroužek uložit do drážky. Tento způsob je výhodný, protože kroužky těsní i za mírného kmitání potrubí a přírub. [9] Do této skupiny se řadí kroužek s kruhovým průřezem tzv. O kroužek. Jde o mnohostranně použitelný těsnící element. Může se ho použít jak pro statické, tak pro dynamické těsnění a dává se mu přednost zejména proto, že zaujímá minimální prostor. Těsnící účinek vzniká jednak tím, že kroužek je svou pružností přitlačován na stěnu součásti a drážky, jednak tím, že se deformuje tlakem těsnícího média. [2] Tohoto těsnění se užívá do hydraulických a pneumatických válců, pístních tyčí, plunžrů, atd. Je jednoduché, a proto se snadno vyrábí i montuje. [9]

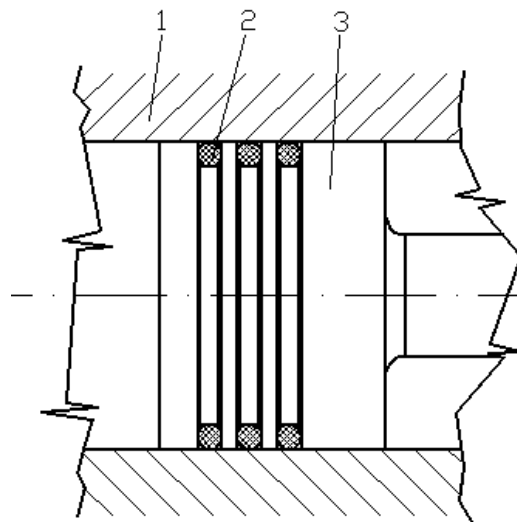


Obr. č. 41 - Těsnící kroužek s kruhovým průřezem



Obr. č. 42 - Příklad tvaru drážek a odpovídajícího tvaru těsnění

Příklad použití těsnících kroužků je znázorněn na (Obr. č. 43).



Obr. č. 43 - Příklad utěsnění kroužkem kruhového průřezu

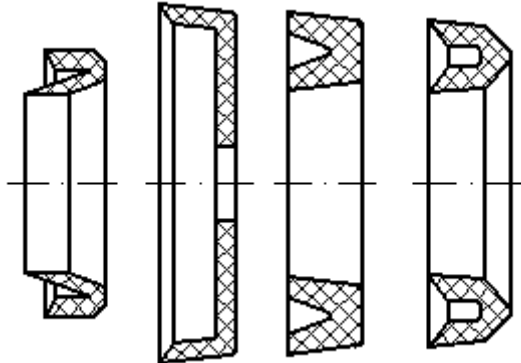
(1 – těleso válce, 2 – pryžové těsnění, 3 - píst)

Řezané těsnění - Vyrábí se pouze čtvercového průřezu. (Toto těsnění lze vyrobit i s obdélníkovým průřezem, avšak nedoporučuje se to). Výhodou tohoto těsnění je jeho levná výroba.

Nevulkanizované těsnění - Používá se ho buď jako kroužků, nebo tmelů v potravinářském průmyslu při konzervování potravin.

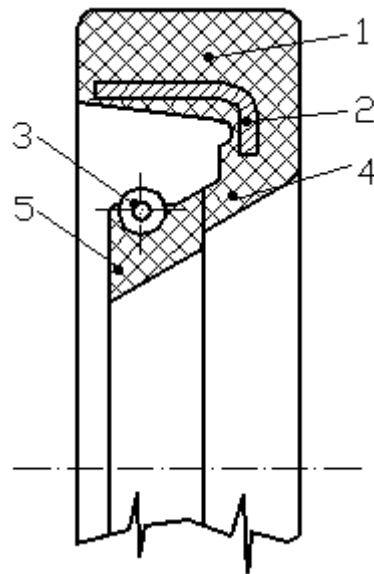
Stříkané těsnění - Těsnění různých tvarů pro utěsnění okenního skla automobilů, dveří atd. Nejvýhodněji se vyrábí stříkáním buď jako těsnění dodávané v běžných délkách, nebo stříkané polepované dodávané v rámech. Toto těsnění se vyrábí z měkké pryže všeobecných vlastností nebo odolávající částečně oleji, teplu nebo mrazu. Těsnění se vtlačuje do spárů nebo se lepí.

Ucpávky a manžety - Toto těsnění přiléhá na povrch tuhé součásti jednak vlastní pružností, jednak je na ni přitlačováno tlakem těsněného prostředí nebo zvláštními přitlačnými kroužky. Podle použití a tvaru se vyrábí ve dvojitým provedení, a to nevrstvené a vrstvené. Těsnění nevrstvené je celopryžové, tvářené převážně ve formách a někdy vyráběné na vytlačovacích strojích. Těsnění vrstvené je vyrobeno z pogumovaných textilních vrstev. Je tvářeno výhradně ve formách. [9] Snaha o dokonalé utěsnění součástí pohybových ústrojí za různých provozních podmínek si vynutila řešení různých tvarů manžetových ucpávek. [2]



Obr. č. 44 - Základní tvary pryžových manžet
(zleva jazýčková, misková M, profilová U, profilová Y)

Hřídelové těsnění - Používá se pro těsnění rotačního pohybu hřídelů nebo maximální omezení protékání oleje nebo jiných kapalin. Vyrábí se pro stroje pomaluběžné, běžící za sucha a pro vyšší tlaky. [9] Také chrání strojní součásti v těsněném prostoru proti vnikání prachu a nečistot. K nejvýznamnějším těsněním tohoto druhu je hřídelové těsnění Gufero. Jeden z typů je vyznačen na (Obr. č. 45).



Obr. č. 45 - Hřídelové těsnění Gufero (1 - pryž,
2 - kovový kroužek, 3 - kruhová pružina, 4, 5 -
těsnící břity)

Ochranné kryty - Chrání jemná ústrojí nebo vzájemně proti sobě se posouvající kovové součásti proti prachu, vodě, oleji atd. Při navrhování nového druhu ochranného krytu je nutné dbát těchto zásad: hrany musí být zaobleny, stěny pokud možno stejně tlusté, ne tenčí než 1 mm a ne tlustší než 3 mm, kryt nemá být válcový, ale kuželový. [9]

6 ZÁKLADNÍ ZKOUŠKY VÝROBKŮ Z PRYŽE

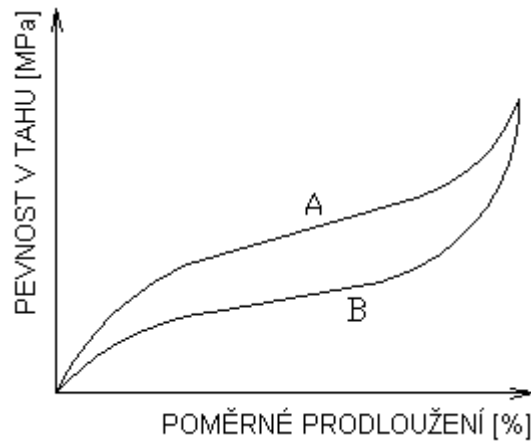
K orientačnímu rozlišení je v současné době využíváno základních fyzikální vlastností. Jsou to tvrdost, pevnost, tažnost, elasticita dále strukturní pevnost a hustota. Tyto údaje však nestačí pro posouzení vhodnosti elastomeru pro konstrukční prvek. Pro výběr elastomeru je nutno posoudit vhodnost elastomeru pro funkční podmínky konstrukčního prvku. Proto je nutno stanovit další vlastnosti jako je odolnost prostředí, v němž bude konstrukční prvek pracovat. Mezi ně patří zejména chemické vlivy prostředí, teplotní zatížení, elektrické vlastnosti, způsob jeho zatížení apod. [5]

Zkoušky materiálu je možné rozdělit ze dvou hledisek. První je hledisko výrobce, eventuálně prodejce materiálu a druhé je hledisko konstrukční. Výrobci a prodejci srovnávají vyrobený, dodaný materiál se standardem nebo srovnávají jejich fyzikální, případně chemické vlastnosti s tabulkovými. Konstrukteři naopak využívají zjištěné fyzikální vlastnosti materiálu pro konstrukci konkrétních výrobků. Dále se je možné setkat se zkouškami provozními či technologickými, které již probíhají na základě dodavatelsko-odběratelských dohod. [5]

Je nutné se zmínit o skutečnosti, že fyzikální hodnoty jsou měřeny na zkušebních vzorcích vyrobených v úzké toleranci technologických podmínek, navíc za napětí v praxi se nevy-skytující. Z toho vyplývá důležitost kontroly konstrukčních fyzikálních veličin přímo na výrobcích. [5] Fyzikálně-mechanické vlastnosti pryže se zkoušejí na vzorcích směr-ovaných z provozu. Z těchto vzorků vulkanizuje výrobce v laboratoři standardní zkušební tělesa, na kterých se pak provádí samostatné zkoušky. Některé z nich jsou uvedeny v následujících podkapitolách. [3]

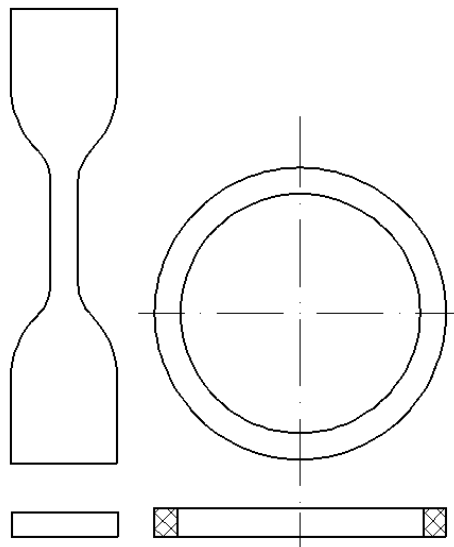
6.1 Tahová zkouška

Tahové zkoušky jsou v zásadě velmi jednoduché. Používá se jich pro získání informativního obrazu o celkových vlastnostech elastomerů. Zpravidla se jimi kontroluje pravidelnost technologických postupů ve výrobě, zejména vulkanizace. Postupuje se při nich tak, že se zkušební těleso postupně zatěžují až po určitou hodnotu zatížení. Těleso se postupně prodlužuje podle křivky A (*Obr. č. 46*). Při tomto zatěžovacím procesu koná těleso práci, jejíž velikost je dána plochou ohraničenou křivkou A, v pořadnici zatěžovací síly F a osou X . [7]



Obr. č. 46 – Pracovní diagram dvou různých elastomerů se stejnou mezí pevnosti (A – pryž s vysokým modulem, B – pryž s nízkým modulem)

Zkoušky pevnosti v tahu se provádí na trhacích strojích tak, že se normalizované zkušební těleso deformuje (natahuje, stlačuje) konstantní rychlostí a zaznamenává se průběh změny sledované fyzikální hodnoty. [7] K těmto zkouškám se používá zkušebních těles tvaru kroužku, nebo oboustranných lopatek, jejichž tvary jsou uvedeny na (Obr. č. 47). Hodnoty tahových vlastností, dosažené na různých tvarech nejsou srovnatelné. Tyto zkušební tělesa se připravují vysekáváním zvláštními noži s dokonalým ostřím. [13]



Obr. č. 47 – Schéma zkušebních těles pro tahové zkoušky

Příslušné pojmy se definují:

Napětí v tahu - je napětí stanovené z podílu síly F [N] (působící kolmo k uvažovanému průřezu) a původního průřezu S [m²].

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (17)$$

kde σ [MPa] je smluvní napětí.

Poměrné prodloužení - je poměr změny délky pracovní oblasti zkušební tělesa ($\Delta l = l - l_0$) k původní měřené délce l_0 v procentech.

$$\varepsilon = \frac{(l-l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (18)$$

Tažnost (poměrné prodloužení při přetržení) - je poměrné prodloužení zkušební tělesa v okamžiku přetržení v procentech: [7]

$$\varepsilon_p = \frac{(l_p-l_0)}{l_0} \cdot 100 \quad (19)$$

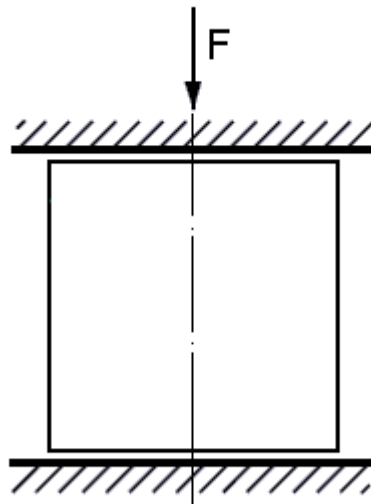
kde l_p je délka pracovní části při přetržení.

Modul v tahu - Je poměrné napětí, při kterém se dosáhne určitého předem zvoleného prodloužení pracovní části zkušební tělesa. Modul se stanoví podle jakosti zkoušeného materiálu při různých prodlouženích. [13] Zpravidla se stanoví modul při poměrných prodlouženích 50, 100 a 300 % pro elastomery s tažností do 400 %, při poměrných prodlouženích 100, 300 a 500 % pro elastomery s tažností do 750 % a při poměrných prodlouženích 300, 500 a 700 % pro elastomery s tažností nad 750 %. [7]

6.2 Tlaková zkouška

Ačkoliv pryžové výrobky jsou v provozních podmínkách namáhány více tlakem než tahem, jsou tlakové zkoušky méně rozšířeny než tahové. Tuto skutečnost je možno vysvětlit obzvláště velmi obtížným vyhodnocováním průběhu tlakové deformace. Potíže vzplývají z vlastního charakteru pryže. [13] Z hlediska konstrukce výrobků je nejdůležitější modul pružnosti v tlaku, který udává tlakové napětí, způsobující jednotkovou pružnou deformaci.

Zkušebním tělesem je obvykle váleček o normalizovaném průměru a výšce. Zkoušky se dělají - na trhacím stroji pro tlakové zkoušky. Tlak se zvětšuje rovnoměrnou rychlostí do porušení zkušební tělesa. [2]



Obr. č. 48 - Schéma tlakové zkoušky

Příslušné pojmy se definují:

Pevnost v tlaku - se rozumí největší zatížení vztažené na původní průřez, které zkušební těleso při tlakové zkoušce snese. Je dána vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (20)$$

Poměrné stlačení - je poměr rozdílu výšky tělesa před stlačením h_0 a po stlačení h k výšce před stlačením. Vyjadřuje se vztahem:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (21)$$

Pro pružnou fázi tlakové deformace je konstantou úměrnosti mezi napětím a poměrným stlačením statický modul pružnosti v tlaku. Platí: [7]

$$E = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta h}{h_0}} = \frac{F h_0}{S \Delta h} \quad (22)$$

Tento vztah platí jen pro velmi malá stlačení, u nichž dochází k minimálním změnám tvaru vlivem tlaku. [7]

Trvalá deformace elastomery v tlaku je změna výšky zkoušeného tělesa, vyjádřená v procentech použité deformace. Určuje se podle ČSN 62 1456. Zkušební těleso válcového tvaru (výšky h_0) je vloženo mezi paralelní plochy stlačovacího zařízení, zatíží na zvolenou deformaci ($h_0 - v$), jejíž velikost se řídí tvrdostí elastomeru. Těleso se po předepsanou dobu

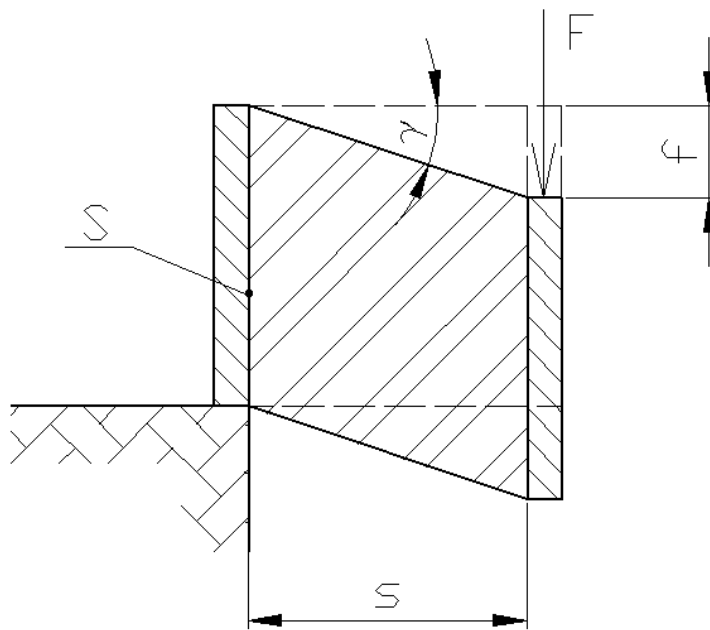
temperuje při stanovené teplotě. Po skončení zahřívacího cyklu se těleso vyjme a ochladí při teplotě místnosti, načež se změří jeho výška h . Trvalá deformace se určí ze vztahu: [7]

$$E = 100 \frac{h_0 - h}{h_0 - v} \quad (23)$$

6.3 Zkouška ve smyku

Další důležitou veličinou je statický modul pružnosti ve smyku, který se zpravidla označuje G_{stat} nebo G_s . Je to poměr smykového napětí k poměrnému posunutí (zkosu). Má konstantní velikost, jestliže předpokládáme lineární závislost mezi smykovým napětím a zkosem. Vyjadřuje se v MPa. U pryže se určuje podle ČSN 62 1449.

Velikost modulu pružnosti ve smyku se u elastomerů stanoví na zkušebním tělese, (Obr. č. 49), jehož elastomerní část má tvar hranolu a na čelech navulkanizované kovové desky. Zjišťuje se závislost smykové deformace na zatěžovací síle. [7]



Obr. č. 49 - Smykové namáhání

Podle (Obr. č. 49) platí:

$$G_s = \frac{\tau}{\gamma} \quad (24)$$

kde:

τ - je průměrné smykové napětí [MPa],

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (25)$$

F - velikost zatěžovací síly [N],

S - čelní plocha zkušebního tělesa [m²],

γ - zkos [-],

γ - f/s (pro malé deformace) [-],

f - velikost deformace ve směru síly F [m],

s - výška vzorku před zkouškou [m].

Po dosazení do rovnice pak platí:

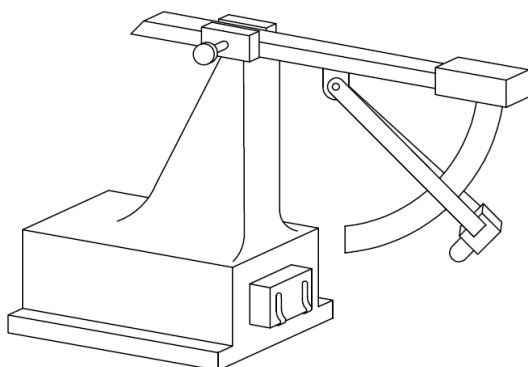
$$G_s = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Fs}{sf} \quad (26)$$

6.4 Zkouška odrazové pružnosti

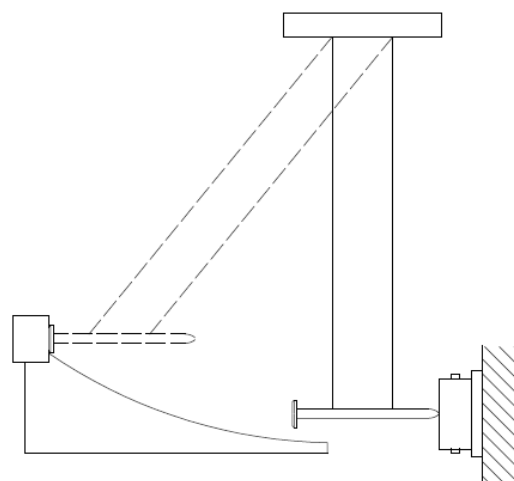
Zkouška odrazové pružnosti je jednou z nejnámějších metod k určování schopnosti pryže absorbovat mechanickou energii při rázu. Princip Metody je založen na měření výšky odrazu ocelového kyvadla s kuličkou, které dopadlo z určité výšky na vzorek. Poměr výšky odrazu a dopadu, vyjádřený v procentech, udává hodnotu odrazové pružnosti. [13].

Zjišťuje se na zkušebním zařízení Schopperově-Schobově podle ČSN 621480. (Z jiných zkušebních metod se používá ještě metody Lüpke.) Tato zkouška je určena pro kontrolu odrazové pružnosti elastomerních materiálů, méně vhodná je pro zjišťování elastických vlastností při vývojových zkouškách. [7]

Hodnota odrazové pružnosti závisí na tloušťce zkušebního tělesa, povrchu pryže a teplotě při zkoušení. Nejnámější přístroj na stanovení odrazové pružnosti je přístroj Liipke, jehož schéma je uvedeno na (*Obr. č. 51*).



Obr. č. 50 - Schéma Schobova přístroje pro zkoušení odrazové pružnosti



Obr. č. 51 - Schéma přístroje Lüpke pro zkoušení odrazové pružnosti

6.5 Zkouška tvrdosti

Tvrдость je vlastnost elastomerů odporovat vlačování cizího tělesa zvenčí. Měrnou jednotkou tvrdosti elastomerů je dílek Shore stupnice rozdělené na 100 stejných dílků. Označuje se °Sh. Podstatou stanovení tvrdosti elastomerů podle Shora je měření odporu proti vlačování ocelového hrotu (normalizovaného tvaru) do elastomerního zkoušeného tělesa. U pryže se určuje se podle ČSN 62 1431. Hodnoty tvrdosti získané jinými metodami se převádějí na Shorovy stupně pomocí převodních tabulek. Nově se využívá metoda IRHD, která dovoluje měření tvrdost vzorků malých tloušťek. [7]

6.6 Zkoušky strukturní pevnosti

Do této skupiny lze zařadit hlavně zkoušky odporu proti natržení a dalšímu trhání a dále zkoušky odolnosti proti odírání, které jsou velmi důležité pro hodnocení různých pryžových materiálů, používaných zejména při výrobě pneumatik. [13] Odpor proti natržení a dalšímu trhání se zkouší na běžných trhacích strojích se speciálně upravenými zkušebními tělesy. Odolnost proti odírání se vyjadřuje jako hmotnostní nebo objemový úbytek zkušební tělesa pryže, vyjádřený v procentech vzhledem ke standardní pryži. [2]

6.7 Zkouška křehkosti za nízkých teplot

Při zkoušce křehkosti pryže při ohybu za nízkých teplot se mění nejvyšší záporná teplota ve °C, při které se tři po sobě následující zkušební tělesa při náhlém ohnutí o 45° zlomí.

Za snížených teplot se provádí řada dalších zkoušek, např. zkouška odolnosti pryže v tahu, trvalé prodloužení nebo zkouška torzní tuhosti. [2]

6.8 Zkoušky stárnutí

Hlavními činiteli zkracujícími životnost pryžových materiálů jsou vzdušný kyslík, zvýšená teplota, světlo, ozón a dynamické namáhání. Vlivem těchto i některých dalších faktorů nastávají v pryži určité fyzikálně chemické změny, které vedou ke zhoršení jejich mechanických vlastností a později k úplné destrukci materiálu. Tento pochod se obecně nazývá stárnutí. Vzhledem k spotřebě kaučuku v nejrůznějších pryžových výrobcích je velmi žádoucí, aby stárnutí pryže probíhalo co nejmaleji, a proto byla vyvinuta řada metod k jeho zkoušení.

Nejstarší metodou je způsob přirozeného stárnutí. Vzorke pryže se vystavují v napjatém stavu účinku povětrnostních vlivů po dobu několika měsíců, popř. i let. V jednotlivých časových úsecích se zjišťují fyzikální hodnoty pryže a vzájemně se porovnávají. Metoda je velmi zdlouhavá, zastaralá a obtížně reprodukovatelná, protože podmínky zkoušek nejsou zcela srovnatelné v důsledku měnících se povětrnostních podmínek. [2]

Proto byla vyvinuta řada metod pro stanovení stárnutí pryže ve zkrácené době, které se souhrnně nazývají zrychlené stárnutí pryže. Mezi tyto metody patří například zkouška stárnutí v prostředí horkého vzduchu, kdy je zkušební těleso namáháno proudem horkého vzduchu. Z dalších metod rychlého stárnutí je třeba uvést stárnutí v prostředí kyslíku resp. při zvýšené koncentraci ozónu. I při těchto zkouškách se porovnávají fyzikální vlastnosti vulkanizátu před stárnutím a po něm.

6.9 Zkouška bobtnání

Bobtnání pryže je poměrná změna hmotnosti nebo objemu zkušebního tělesa vloženého do rozpouštědla za různou dobu při různých teplotách. Výsledky zkoušky bobtnání se vyjadřují v procentech a vyjadřují poměrnou změnu tělesa po bobtnání proti původnímu stavu. V závislosti na funkčních požadavcích kladených na zkoušený výrobek mohou být po nabobtnání hodnoceny další vlastnosti, např. pevnost, protažení, tvrdost, elasticita apod.

6.10 Propustnost pro plyny a kapaliny

Propustnost pryžových materiálů pro plyny a kapaliny se zkouší u výrobků, kde to je z hlediska jejich praktického využití nezbytné. U výrobků z technické pryže se to týká především různých membrán a těsnění.

Propustnost pro plyny a kapaliny se stanovuje na speciálních přístrojích, kde se měří množství vzduchu nebo kapaliny, jež projde při konstantním podtlaku pryžovým vzorkem za určitou dobu. [2]

1. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ

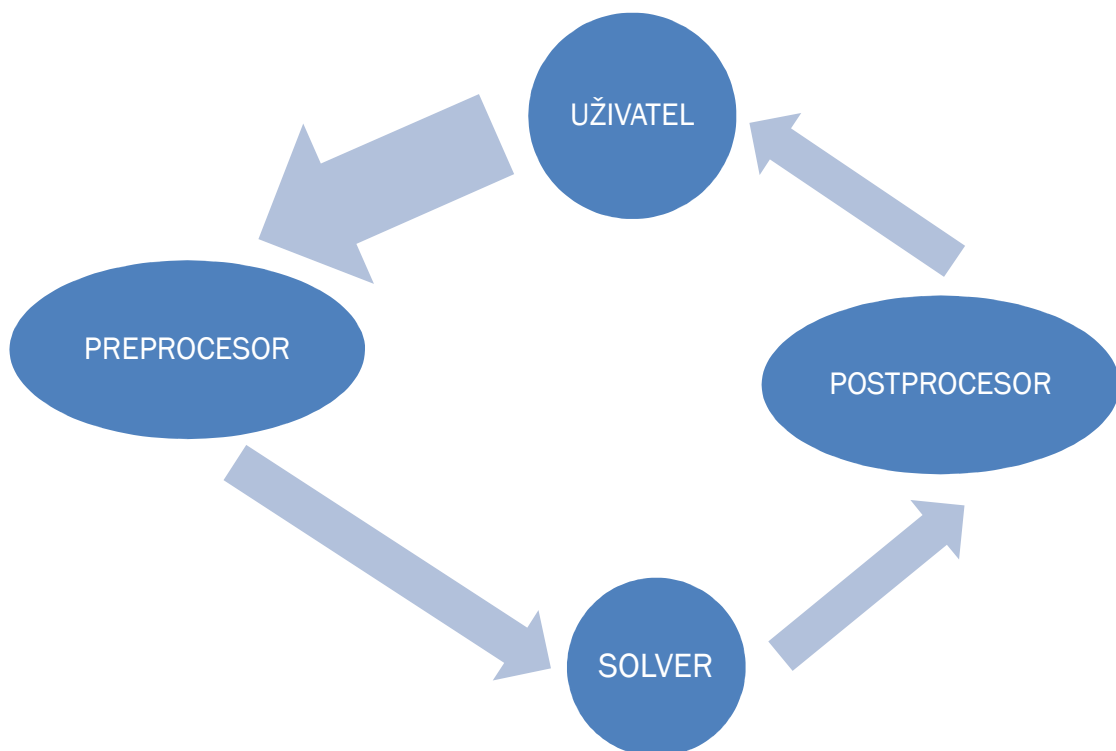
Cílem této diplomové práce je numerická simulace a tvarová optimalizace pryžové manžety při jejím stlačování tak, aby bylo dosaženo požadované velikosti rovnoměrného stlačení, přičemž nesmí dojít k nežádoucímu zborcení. Výrobek byl podroben simulaci pomocí softwaru, který pracuje na metodě konečných prvků. Bylo třeba analyzovat a vyhodnotit analýzu současné manžety, poté byly upravovány tvarové parametry (zaoblení, tloušťky), které bylo dovoleno měnit. Tyto parametry byly pak postupně upravovány a byl vyhodnocen jejich vliv na výrobek při stlačování. Na základě těchto výsledků byl navržen konečný tvar manžety.

8 SOFTWAREVÁ PODPORA

Numerická analýza a tvarová optimalizace byla provedena pomocí softwarové podpory. Pro tvorbu geometrických 3D modelů manžet byl použit program Catia V5R18, jedná se o software pro 3D počítačové konstruování v oblastech CAD/CAM/CAE. Dále to byly programy MSC.Patran a MSC.Marc. Tyto systémy budou dále popsány v podkapitolách 8.2, 8.3.

Obecně platí, že postup analýzy je rozdělen do tří základních fází

- Preprocessor – slouží k zadání vstupních dat a parametrů pro výpočet. K Tomuto účelu byl použit software MSC.Patran.
- Solver (řešič) – provádí řešení (výpočet) analýzy. Jako solveru bylo využito programu MSC.Marc.
- Postprocessor – slouží k zpracování a vyhodnocování výsledků analýz, zde také byl použit software MSC.Marc.



Obr. č. 52 – Postup analýzy

8.1 MSC. Patran

Software PATRAN je obecný preprocessor a postprocessor vhodný pro všechny programy firmy MSC Software. Jeho otevřená architektura ho však umožňuje použít pro přípravu

konečně-prvkových modelů a načítání výsledků pro libovolný MKP software. Je určen pro přípravu modelů pro lineární či nelineární úlohy.

Proces tvorby konečně-prvkového modelu je poměrně časově náročná úloha, která průměrně zabírá 60% celkového času analýzy daného problému. MSC.Patran obsahuje všechny důležité nástroje pro přípravu a tvorbu úloh MKP. Obsahuje funkce pro import geometrických modelů, jejich úpravu a čištění. Dále obsahuje nástroje pro vlastní tvorbu konečně-prvkové sítě, tj. jak manuální, tak automatickou tvorbu. Obsahuje také mnoho funkcí pro zadávání okrajových podmínek. Provádí automatickou tvorbu vstupních souborů pro většinu populárních MKP řešičů. Obsahuje mnoho funkcí pro získání výsledků a jejich další zpracování jednak v textové a také grafické formě. [16]

8.2 MSC.MARC/MENTAT

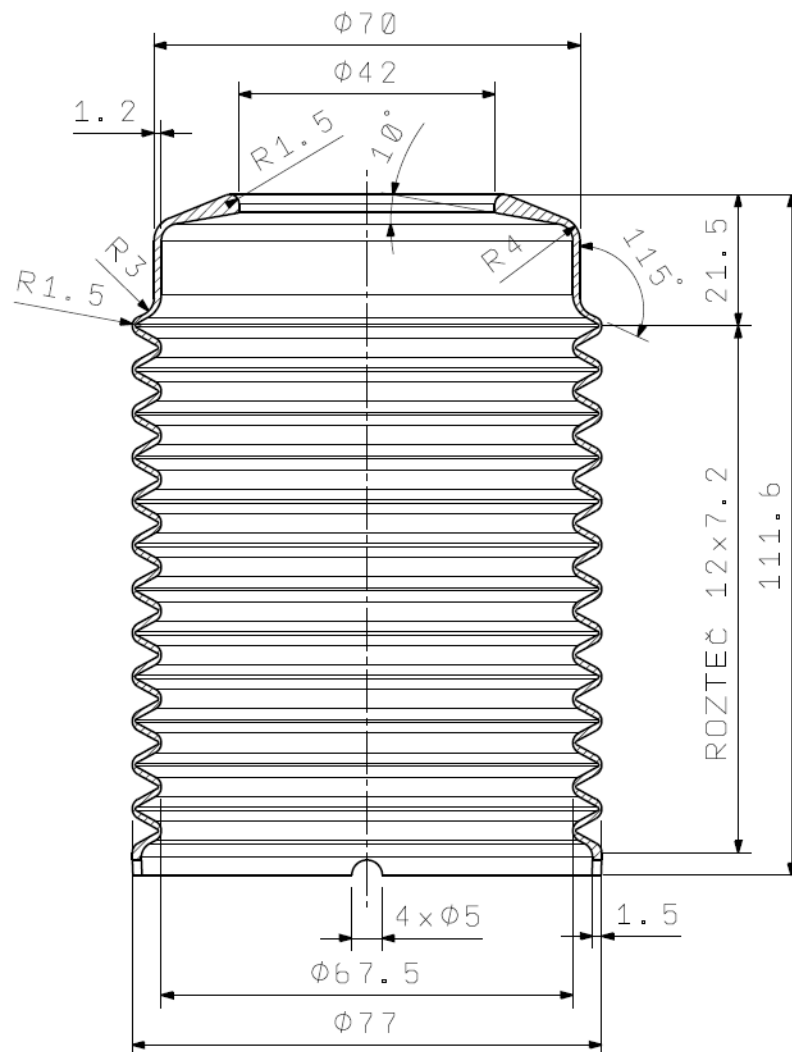
Program MSC.Marc/Mentat slouží k numerickému řešení úloh v oblasti fyziky a používá deformační variantu metody konečných prvků. Tímto programem je možno řešit široké spektrum úloh statiky, kinematiky, dynamiky, pružnosti a pevnosti, úloh mechanického kontaktu těles, creepu, lomové mechaniky, únavy materiálu, popisu chování zemin a hornin, termomechaniky, přenosových jevů, dále také problémy akustiky, proudění tekutin, elektromagnetismu atp. Při vlastním řešení lze uvažovat různé typy materiálů (kovy, kompozitní materiály, plasty, pěny, pryže, skla, zeminy aj.). Kvalita a přednosti tohoto software spočívají především v široké možnosti řešení nelineárních úloh. Velikou pomocí při řešení komplikovaných úloh mohou být také adaptivní změny sítě, zatížení a okrajových podmínek v průběhu řešení ("Adaptive Meshing", "Adaptive Loading", "Rezoning" a "Remeshing"). Program MSC.Marc (řešič) má vlastní pre & postprocesor MSC.Mentat, který není přímo součástí řešiče MSC.Marc. Jako další plně zaměnitelná a kompatibilní alternativa pre & postprocesoru může být použitý také systém MSC.Marc/Patran.

Samozřejmě je možno načítat soubory také z jiných preprocesorů nebo softwarů pracujících na metodě konečných prvků. Za zmínku stojí také to, že MSC.Marc je odborníky považován již téměř 40. let za světovou špičku v oblasti řešení nelineárních úloh, především v oblasti popisu materiálového chování, úloh velkých deformací (např. tváření, elastomery) a mechanického kontaktu těles. [16]

9 TVORBA 3D MODELU

Začátkem práce optimalizace tvaru pryžové manžety bylo zapotřebí vytvořit 3D model výrobku. Dle výkresu, který je součástí přiloženého DVD, byl vytvořen současný návrh manžety. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, k tomuto účelu byl použit software CATIA V5R18. FEM program MSC.Patran vytvoření vlastní geometrie umožňuje, tato možnost je však využívána jen v případě, že danou geometrii tvoří jednoduché tvary.

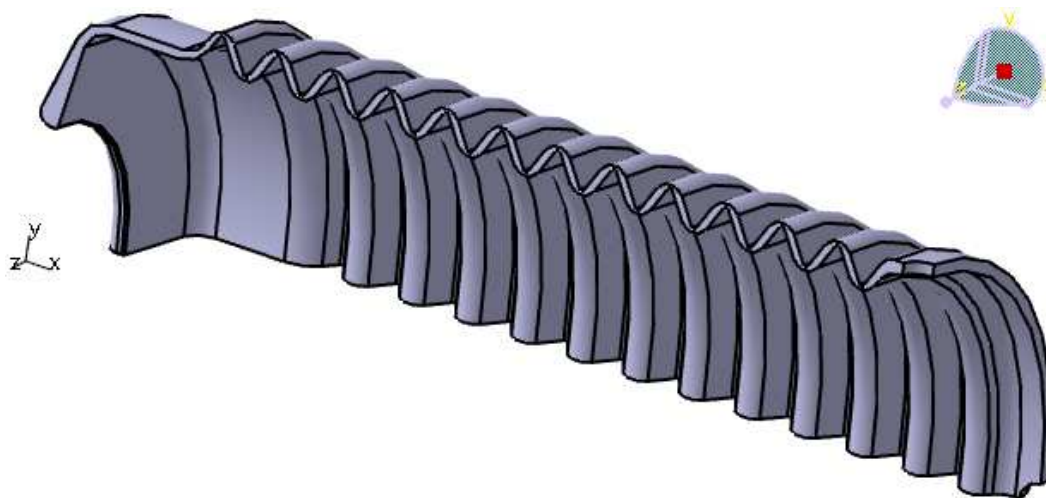
Geometrie tohoto modelu byla proto nakreslena pomocí modulu Part design, který je součástí softwaru CATIA V5R18. Z této geometrie byl poté pomocí příkazu Rotate (otočit) vytvořen pouze čtvrtinový model manžety. Tato úprava byla provedena především z důvodu posuzování tzv. kritéria zborcení, více viz kapitola 11. Toto zjednodušení také zrychluje výpočet analýzy a podává výsledky, ve kterých se lze lépe orientovat. Takto vytvořené modely manžet byly uloženy ve formátu *.CATPart. Dále viz podkapitola 10.2.



Obr. č. 53 – Základní rozměry manžety



Obr. č. 54 – Ukázka celkového modelu manžety



Obr. č. 55 – Čtvrtinový model manžety

10 NASTAVENÍ ANALÝZY MODELU POMOCÍ FEM SOFTWARE

Před každou simulací pomocí FEM software je potřeba udělat řadu kroků, které vedou k nadefinování analýzy. Nadefinování analýzy bylo provedeno, jak již bylo zmíněno, pomocí software MSC.Patran.

Hlavními kroky při práci v tomto software byly:

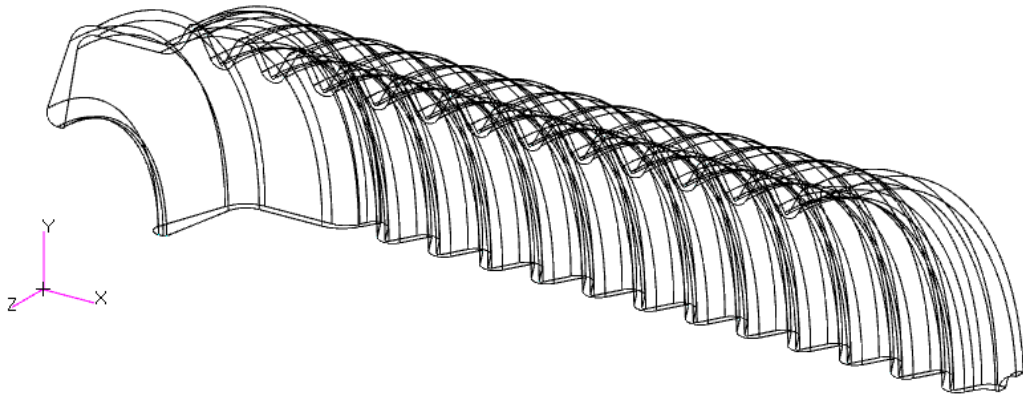
- vytvoření databáze
- vložení nebo nakreslení součásti
- definice materiálových parametrů
- přiřazení vlastností elementu
- vytvoření konečně prvkové sítě
- definice okrajových podmínek a zatížení
- nastavení a spuštění analýzy
- prohlížení výsledků

10.1 Vytvoření nové databáze

Prvním krokem bylo vytvoření nové databáze. Byla vybrána šablona pro řešič MSC.Marc, která obsahovala přednastavená data pro tento software, který prováděl výpočet. Také bylo zadáno jméno databáze s příponou *.db.

10.2 Import modelu součásti

MSC.Patran umožňuje import modelů z mnohých CAD systémů (Pro/Engineer, Unigraphics, I-deas) a v mnoha formátech, jako nejznámější např. *.iges, *.step, *.stl. Jak již bylo zmíněno, byl 3D model manžety připraven v programu CATIA V5R18. Tento způsob umožňoval rychlou a velmi snadnou změnu tvaru geometrie. Výhodou bylo i to, že software MSC.Patran podporuje možnost vložení geometrie 3D modelu vytvořeného v programu CATIA V5R18 s příponou *.CATPart, bez nutnosti převodu na jiný formát. Jako posledním krokem při importování 3D modelu výrobku bylo nastavení délkových jednotek na metry.



Obr. č. 56 – Importovaný 3D model manžety

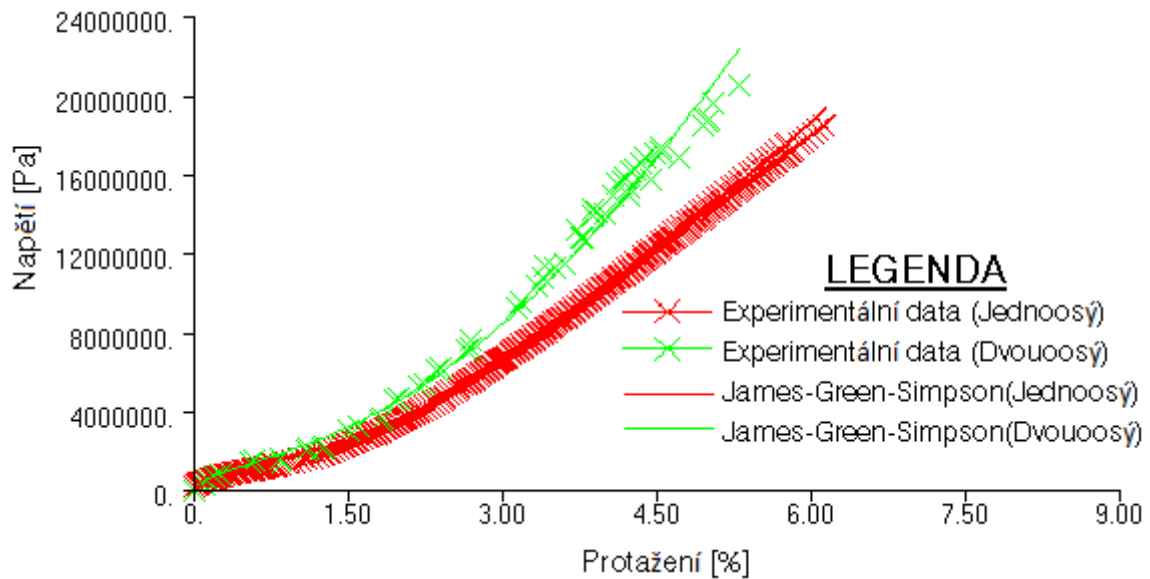
10.3 Definice materiálu

Základní vstupní informace pro výpočet pomocí metody konečných prvků je určení materiálových parametrů. Těmito parametry mohou být modul pružnosti, Poissonovo číslo, tvrdost, hustota, mez skluzu aj..

K definici materiálu manžety bylo použito mechanických zkoušek pryžových materiálů, viz kapitola 3. Konkrétně byly použity zkoušky pro jednoosý a dvouosý tah. Naměřené experimentální hodnoty z těchto laboratorních zkoušek byly zavedeny do softwaru MSC.Patran.

V dalším kroku bylo pro experimentální data nutné nalézt odpovídající matematický model, který by co nejlíže odpovídal výsledkům laboratorních zkoušek. MSC.Patran umožňuje v nabídce výběr z mnoha matematických modelů, např. Neo-Hookean, Ogden, Foam, Arruda-Boyce, Signiarini, Mooney 2. a 3. řádu, kdy po vybrání program automaticky spočítá chybu, kterou model vykazuje od výsledků laboratorních zkoušek. Pro zavedená experimentální data byl vybrán model 3rdOrder Deformation, také známý pod názvem James-Green-Simpson. Tento model vykazoval ze všech modelů nejmenší chybu.

Materiálové konstanty pro tento model byly následující $c_{10} = 429320,75$ Pa, $c_{01} = -14574,229$ Pa, $c_{11}=220,20297$ Pa, $c_{20}=15554,411$ Pa, $c_{30}=84,196663$ Pa.



Graf č. 1 - Porovnání výsledků zkoušek pryže s James-Green-Simpson modelem

10.4 Definice vlastností elementu

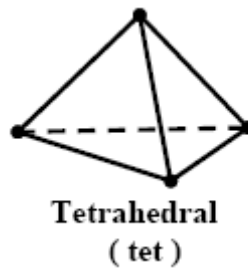
Dalším krokem bylo nastavení vlastností elementu. Geometrii vložené manžety bylo přiřazeno objemové těleso (solid) a následně byl nadefinován materiál výrobku importované geometrie.

10.5 Tvorba FEM sítě

Rozdělení součásti na konečný počet prvků je zásadní proces pro provádění simulací pomocí počítače. Platí, že přesnost výpočtů je ovlivněna množstvím elementů, tedy hustotou sítě. Obecně platí, že větší počet elementů podává přesnější výpočet, avšak je nutnost přihlídnout na výkonnost hardwaru počítače, kdy se s větším počtem elementů prodlužuje čas potřebný na výpočet. Tyto fakta je nutné při tvorbě sítě brát v úvahu.

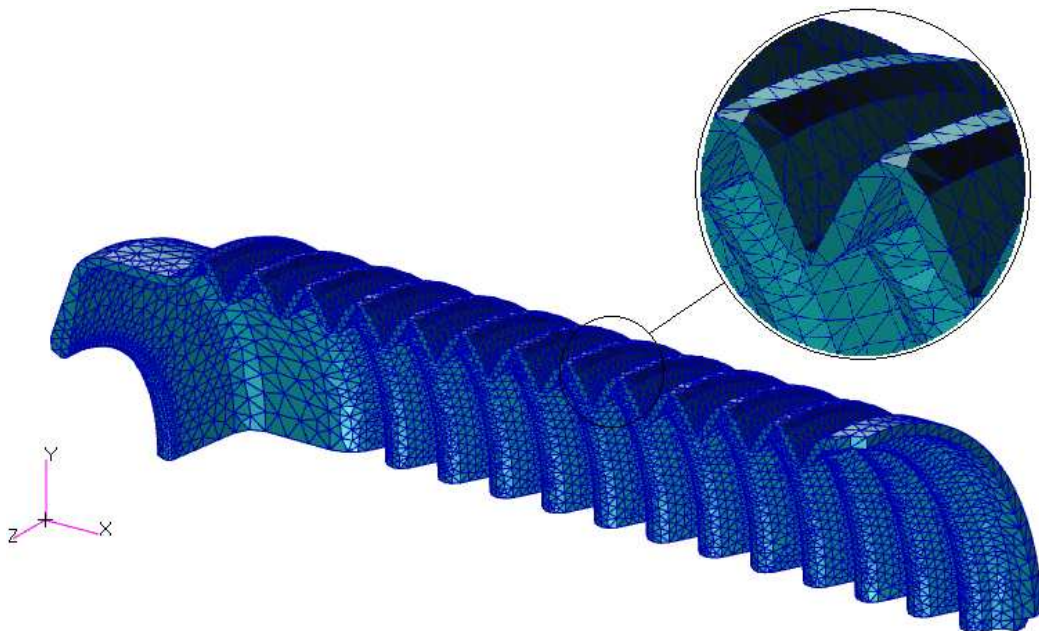
Elementy konečných prvků mají jednoduché geometrické tvary jako úsečka, trojúhelník, obdelník, kostka aj. Body v rozích jsou nazývány uzly (nody). Prostřednictvím těchto uzlů dochází k propojení všech elementů. Tímto způsobem vzniká síť.

Byla zvolena síťovací metoda TetMesh. Pro tuto metodu byla určena topologie elementu, tzv. Tet4. Prvky mají tvar čtyřstěnu tzv. tetrahedron. Tyto elementy jsou určené pro tělesa objemového charakteru (solid) a pro výpočet hyperelastických materiálů. Prvky typu Tet jsou definovány 4 uzly, jak je zobrazeno na (Obr. č. 57).



Obr. č. 57 – Element typu Tet [6]

Velikost elementu je odvozena od velikosti hrany prvku. Bylo využito možnosti definování délky hran elementu automatickou formou, kdy software zvolí optimální velikost hrany s ohledem na velikost síťované geometrie.



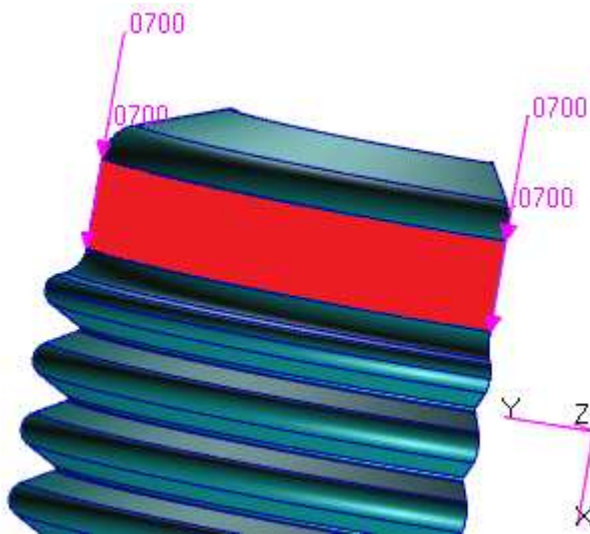
Obr. č. 58 – Model po vysítování

10.6 Definice okrajových podmínek

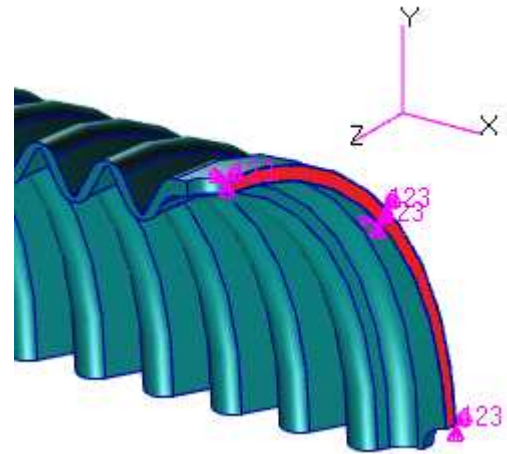
Definice okrajových podmínek je nezbytný krok při provádění analýz pomocí metody konečných prvků. Obecně je snahou okrajové podmínky nastavit tak, aby odpovídali co možná nejvíce reálnému případu.

Postupně byly vytvořeny dvě okrajové podmínky, které byly umístěny z důvodu symetrie součástí. Byly to okrajové podmínky symetrie podle rovin XY a XZ. Poté byla vytvořena podmínka uložení, kdy byla manžeta pevně uchycena na dolní ploše, které byly odebrány tři stupně volnosti a to posun v ose X, Y, Z.

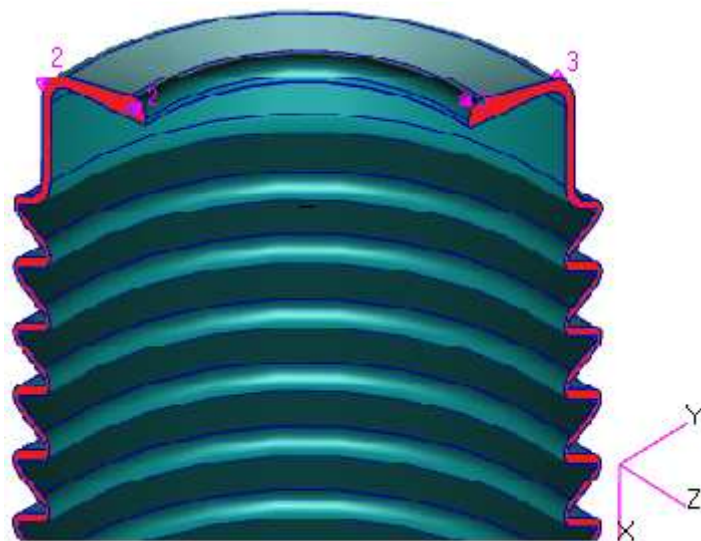
Nakonec bylo nadefinováno posunutí v ose X v horní části manžety. Tento posun byl nastaven na velikost 70 mm.



Obr. č. 59 – Posuv



Obr. č. 60 - Uložení



Obr. č. 61 – Symetrie podle rovin YX a ZX

10.7 Spuštění analýzy

Když je příprava modelu pro analýzu hotová, může počítač analyzovat program a pak použít efektivní matematické rovnice pro výpočet chování jednotlivých prvků s přihlédnutím závislosti na okolních prvcích a přiřazených vlastností. Převodem modelu na konečný počet prvků může počítač analyzovat chování modelu jednoduše a přesně. [10] Analýza byla nastavena pro řešič MSC.Marc. Solver provádí řešení analýzy v přírůstcích tzv. incre-

ments. V rámci každého přírůstku software vyhledává opakovaně řešení do doby, kdy je rovnovážné, poté přejde k výpočtu dalšího kroku. [6]

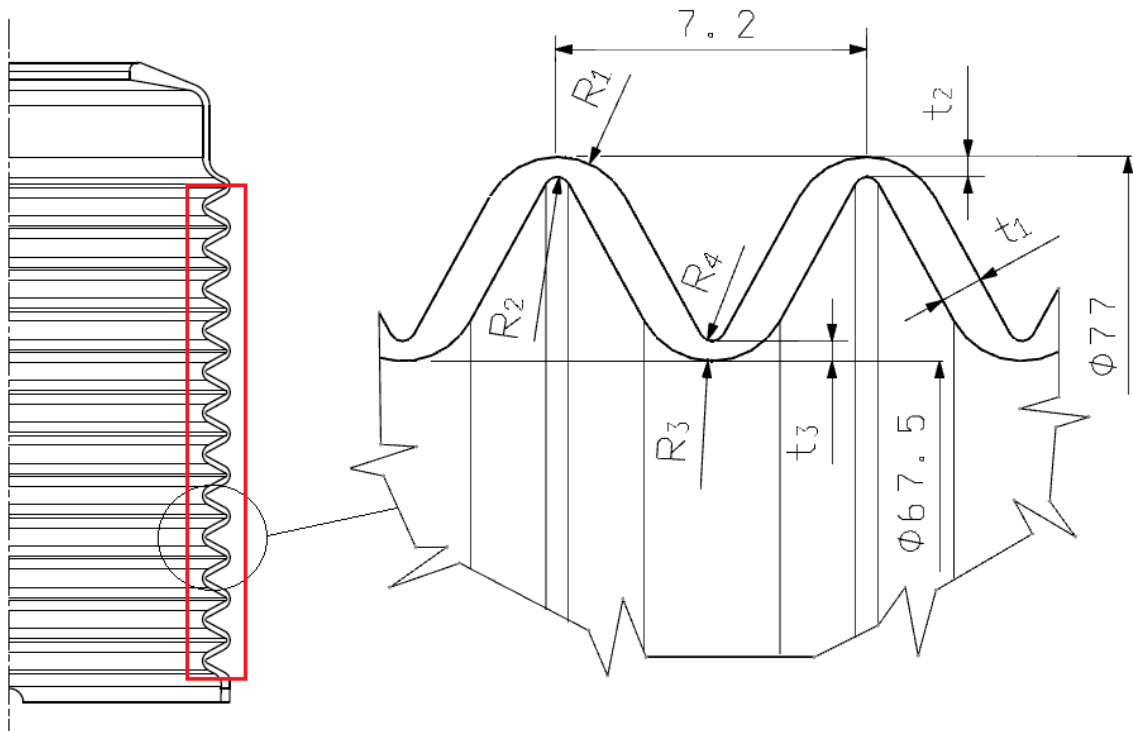
11 TVAROVÁ OPTIMALIZACE

Cílem této diplomové práce byla optimalizace tvaru pryžové manžety, tak aby bylo při stlačování dosaženo plynulého stlačení bez zborcení manžety. Cílem bylo vytvořit takový tvar, aby došlo k rovnoměrnému stlačení o velikosti alespoň 50 mm. V práci budou uváděny pro ukázkou i hodnoty Von Missesova napětí.



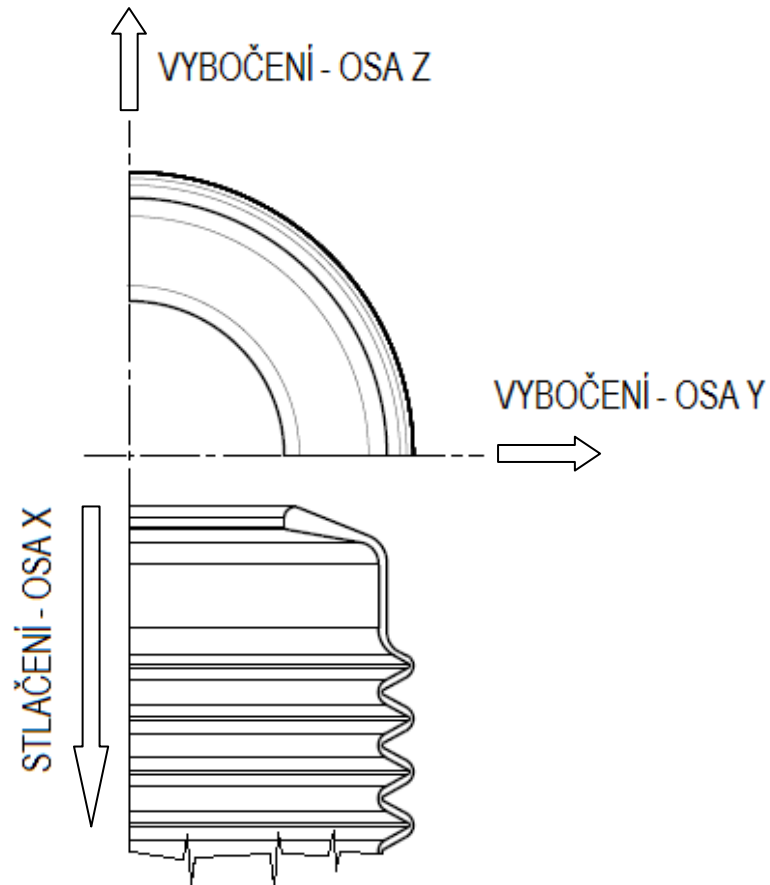
Obr. č. 62 – Ukázka zborcení manžety během stlačování

Optimalizace manžety byla provedena na části, která předně ovlivňuje chování výrobku při stlačování, tato oblast je zobrazena na (Obr. č. 63) červeným rámečkem. Optimalizovaná část je také zakótována na (Obr. č. 53) jako kóta značící rozteč 12 x 7,2 mm. Tvarové parametry, které bylo dovoleno upravovat, znázorňuje i se značením (Obr. č. 63). Ty rozměry, které jsou na tomto obrázku zakótovány, nebylo dovoleno měnit. Vzhledem k tomuto faktu mohou být při změně jednoho z tvarových parametrů ovlivňovány i rozměry jiných parametrů. Velikosti těchto tvarových parametrů byly za účelem optimalizace postupně měněny a byl zkoumán jejich vliv při stlačování manžety.



Obr. č. 63 – Tvarové parametry

Z analýzy bylo zjištěno, že při stlačování manžety dochází postupně k vlnění profilu, které postupně přejde až ke zborcení. Pro posuzování okamžiku, ve kterém dochází k nadměrnému vybočení a následnému zborcení manžety bylo zavedeno tzv. kritérium zborcení. Bylo určeno, že maximální velikost posunutí ve směry osy Y a Z, tedy vybočení profilu, nesmělo přesáhnout hodnotu 2 mm. Podle tohoto kritéria bylo u každého modelu výrobku určeno maximální stlačení, při kterém nedocházelo k nechtěným deformacím.



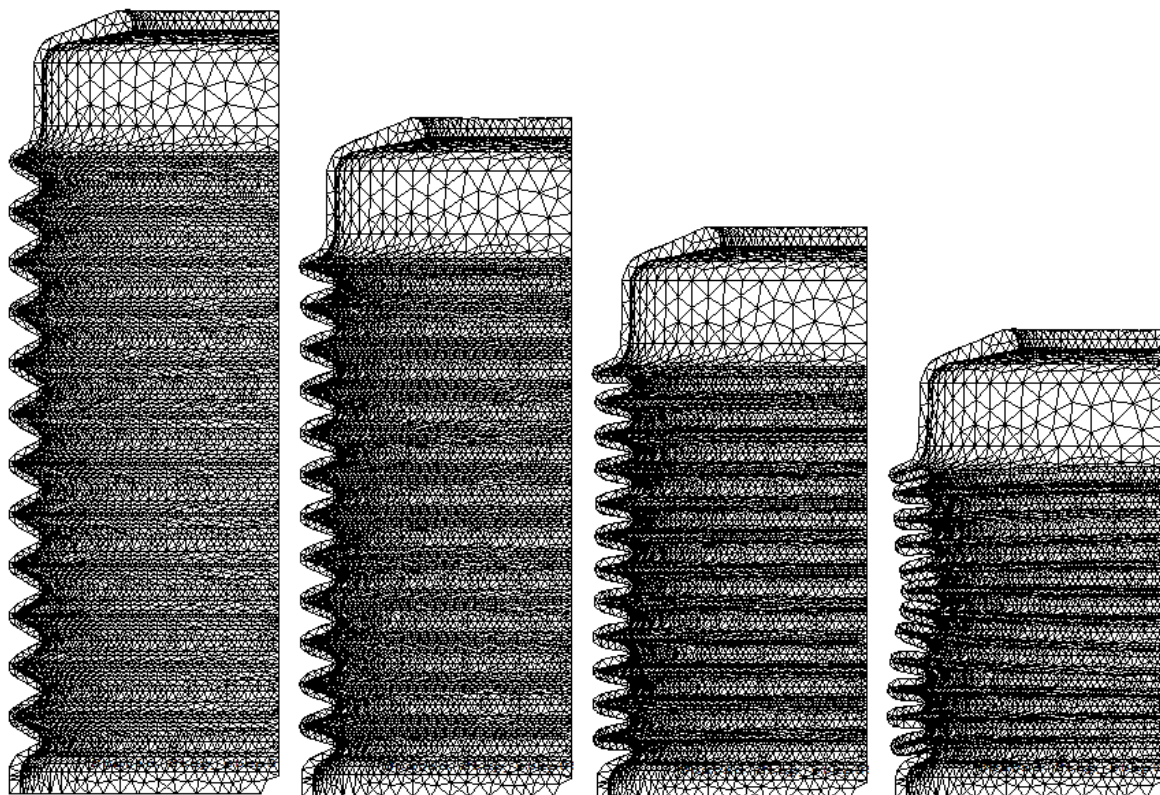
Obr. č. 64 – Znázornění posuvů při stlačování

Výsledky byly vyneseny do tabulky a graficky znázorněny. Na základě těchto analýz bude navržen konečný tvar manžety, který bude vyhovovat požadovanému stlačení.

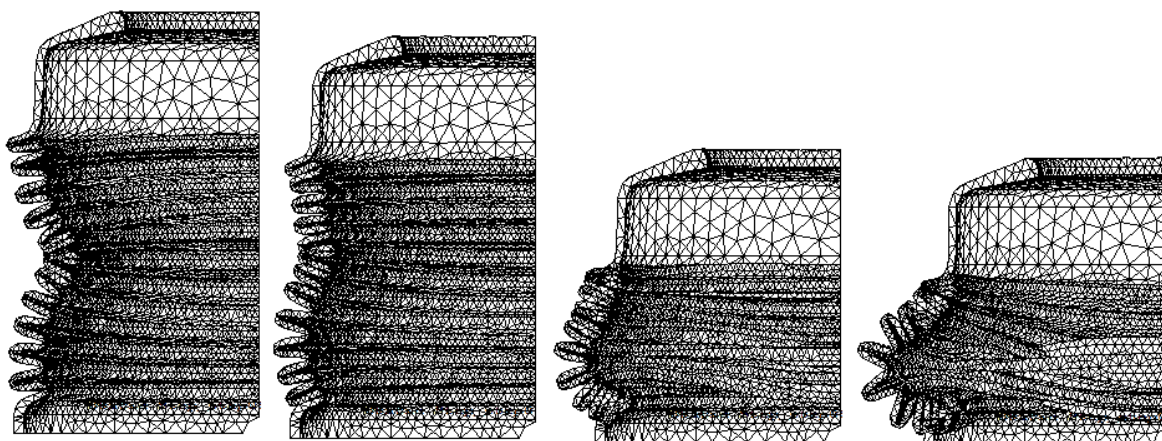
11.1 Analýza současného návrhu

Analýza původního návrhu byla provedena na modelu manžety vytvořené dle zadaného výkresu. Tato manžeta byla vyrobena v praxi, bylo však zjištěno, že tvar nebyl příliš vyhovující. Vlivem malé tloušťky této manžety v záhybech (t_2 , t_3), docházelo v těchto místech k praskání manžety. Rozměry tvarových parametrů, které byly zvoleny u současného návrhu najdeme v (Tab. č. 1)

Grafické znázornění simulace stlačování současného návrhu manžety bylo zaznamenáno na následujících obrázcích.

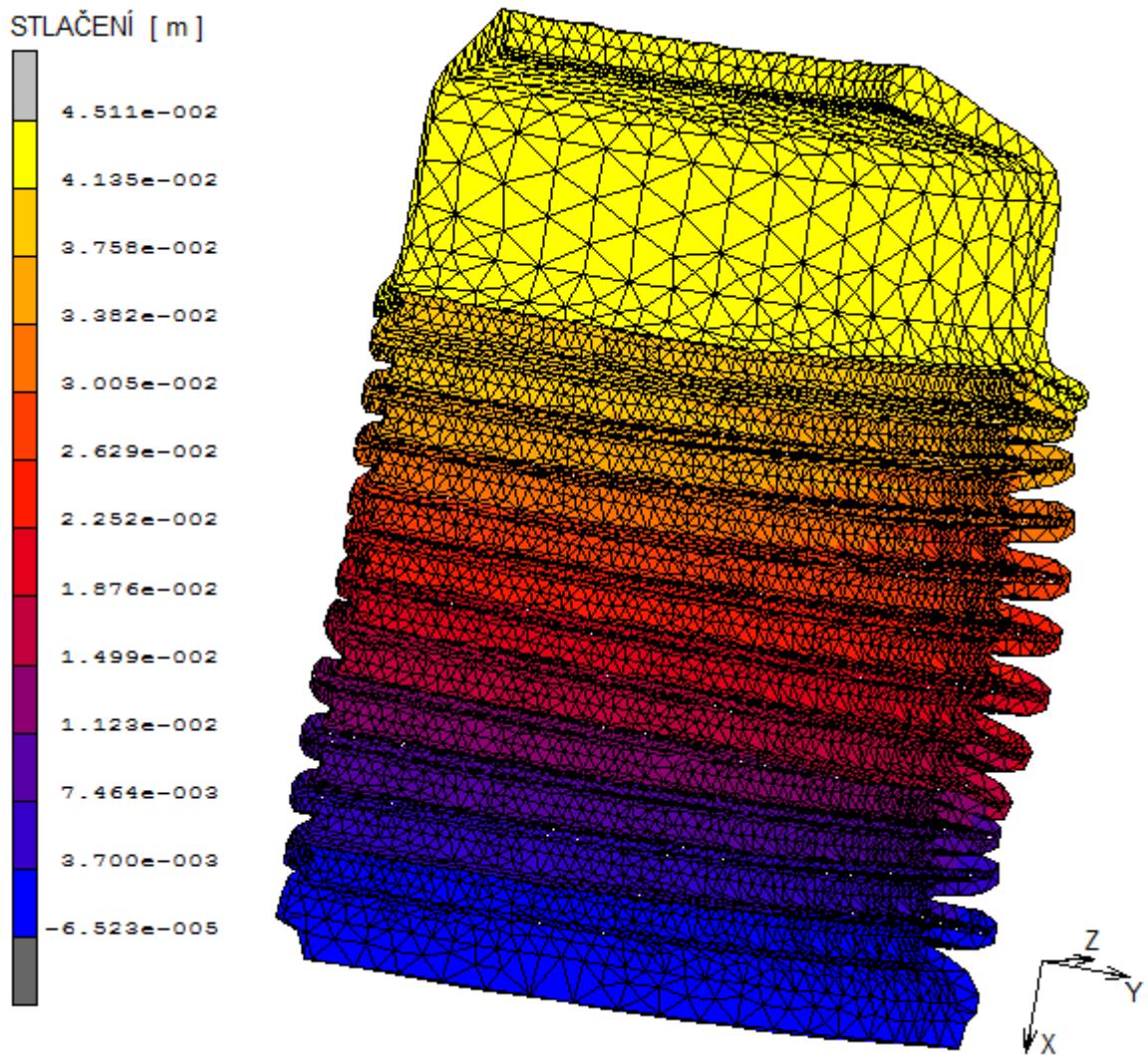


Obr. č. 65 - Znáznornění chování manžety před zborcením



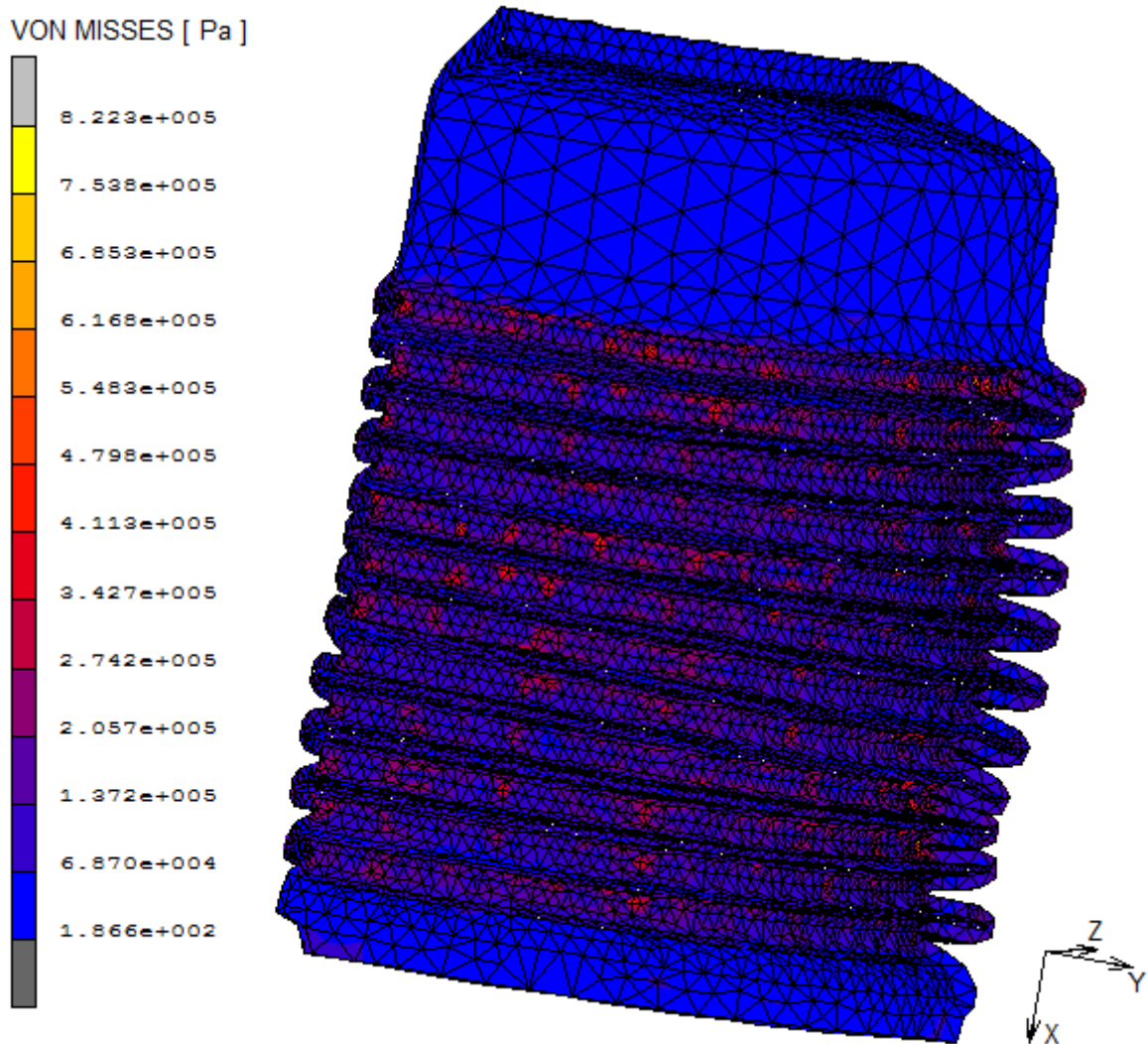
Obr. č. 66 - Znáznornění chování manžety během zborcení

Tvar manžety, velikost stlačení a velikost Von Missesova napětí, které předcházely situaci před zborcením manžety jsou zobrazeny na následujících obrázcích.



Obr. č. 67 – Maximální rovnoměrné stlačení současného modelu

Podle posuzování kritéria zborcení bylo u této manžety dle FEM analýzy zjištěno, že rovnoměrné stlačení probíhá do hodnoty 45,11 mm. Po této hranici dochází postupně k nárůstu vybočení ve směrech osy Y a Z a následnému zborcení jak znázorňuje (Obr. č. 66).



Obr. č. 68 – Von Missesovo napětí současné manžety při maximálním rovnoměrném stlačení

Tab. č. 1 - Rozměry tvarových parametrů a vybrané výsledky analýzy

R ₁ [mm]	R ₂ [mm]	R ₃ [mm]	R ₄ [mm]	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	Stlačení [mm]	Von Misses [Mpa]
1,8	0,3	1,8	0,3	1	0,463	0,463	45,11	0,8223

Jak již byla řečeno, při tomto konstrukčním řešení docházelo k nežádoucímu porušení materiálu. Také stlačení není tato manžeta podle simulace vyhovující. Z výsledků analýzy vyplynulo, že u této manžety nedošlo k rovnoměrnému stlačení na požadovanou hodnotu 50 mm, proto bylo nutné přejít k optimalizaci tvaru výrobku.

11.2 Vliv tvarových parametrů na stlačování manžety

11.2.1 Úprava velikosti vnějších rádiusů R_1 a R_3

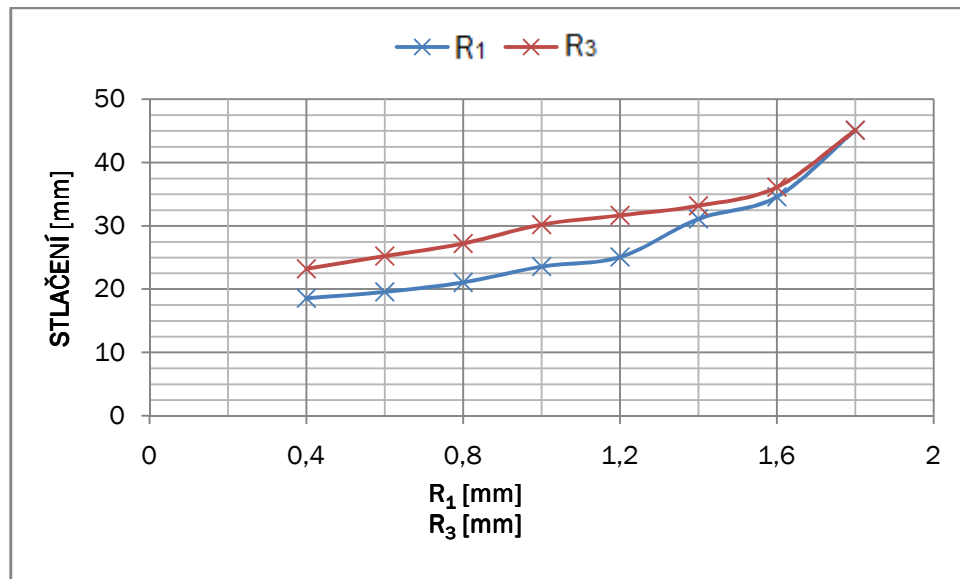
U těchto modelů byly zkoumány vlivy zaoblení R_1 a R_3 samostatně, tedy docházelo ke změně pouze jednoho z rádiusů. Bylo vymodelováno 8 modelů s proměnným rádiusem R_1 a stejný počet modelů s proměnným rádiusem R_3 . Změna zaoblení dosahovala hodnoty od 0,4 do 1,8 mm. Všechny modely byly podrobeny analýze a výsledky byly vyneseny do tabulek, ze kterých byly sestrojeny grafy.

Tab. č. 2 - Změna tvarového parametru R_1

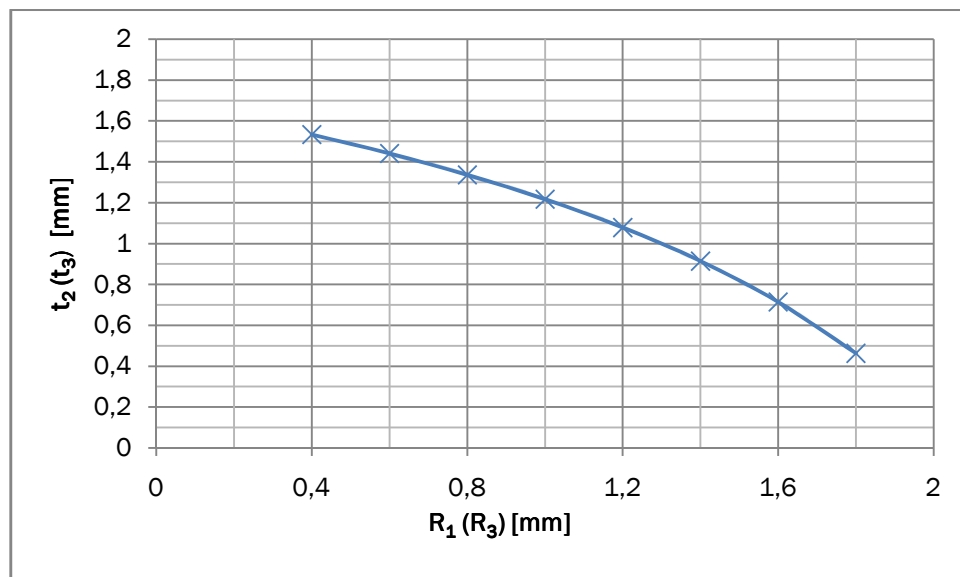
Rozměry tvarových parametrů s výsledky								
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Misses [Mpa]
1,8	0,3	1,8	0,3	1	0,463	0,463	45,11	0,8223
1,6					0,714	0,524	34,59	0,6655
1,4					0,914	0,571	31,09	0,6416
1,2					1,078	0,608	25,08	0,5080
1					1,217	0,638	23,57	0,5752
0,8					1,336	0,664	21,07	0,5598
0,6					1,441	0,685	19,57	0,6529
0,4					1,533	0,704	18,57	0,6316

Tab. č. 3 - Změna tvarového parametru R_3

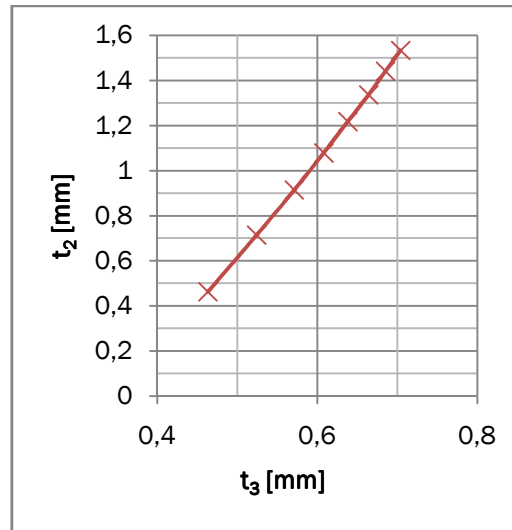
Rozměry tvarových parametrů s výsledky								
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Misses [Mpa]
1,8	0,3	1,8	0,3	1	0,463	0,463	45,11	0,8223
		1,6			0,524	0,714	36,11	0,5830
		1,4			0,571	0,914	33,17	0,7024
		1,2			0,608	1,078	31,65	0,6158
		1			0,638	1,217	30,20	0,5614
		0,8			0,664	1,336	27,21	0,5406
		0,6			0,685	1,441	25,23	0,5538
		0,4			0,704	1,533	23,21	0,5356



Graf č. 2 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_1 a R_3



Graf č. 3 - Závislost změny tloušťky t_2 (t_3) na velikosti zaoblení R_1 (R_3)



Graf č. 4 - Závislost změny tloušťky t_2 a t_3

Z výsledků, které byly vyneseny do tabulek a grafů, lze vyčíst, že při zmenšování vnějšího rádiusu R_1 (R_3) dochází ke změně parametru t_2 (t_3). V případě, kdy dochází ke zmenšování rádiusu R_1 , dochází k nárůstu tloušťky t_2 asi o 1 mm. Tato změna se projeví také na tloušťku t_3 , která však vzroste pouze o 0,24 mm. V případě, kdy docházelo ke změně parametru R_3 měla tato změna na tloušťky t_2 , t_3 opačný vliv. Tedy tloušťka t_2 se změnila jen nepatrně vůči tloušťce t_3 .

Z grafu lze vyčíst, že se zmenšujícím se parametrem R_1 , R_3 dochází k nárůstu tloušťky v záhybech. Graf také dokazuje, že zborcení manžety nastává při menších velikostech stlačení.

11.2.2 Úprava velikosti vnitřních rádiusů R_2 a R_4

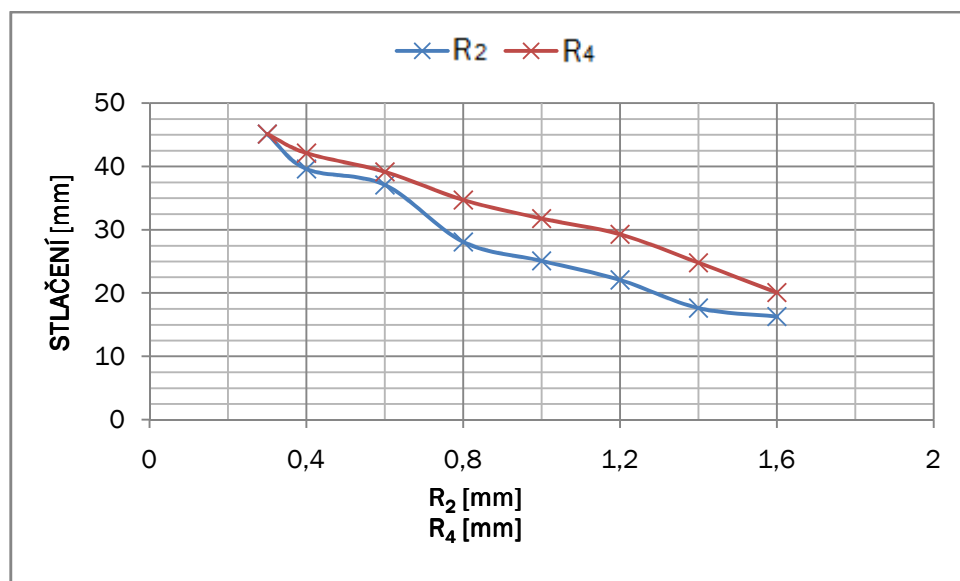
Byla vyhodnocena také úprava vnitřních rádiusů R_2 a R_4 samostatně. Jako u prvního případu byla vymodelována řada modelů, tentokrát však s proměnnými zaobleními R_2 a R_4 . Tyto rádiusy byly u obou případů měněny z hodnoty 0,3 do 1,6 mm. Upravené modely byly podrobeny analýze a výsledky byly zapsány do tabulek, ze kterých byly sestrojeny grafy.

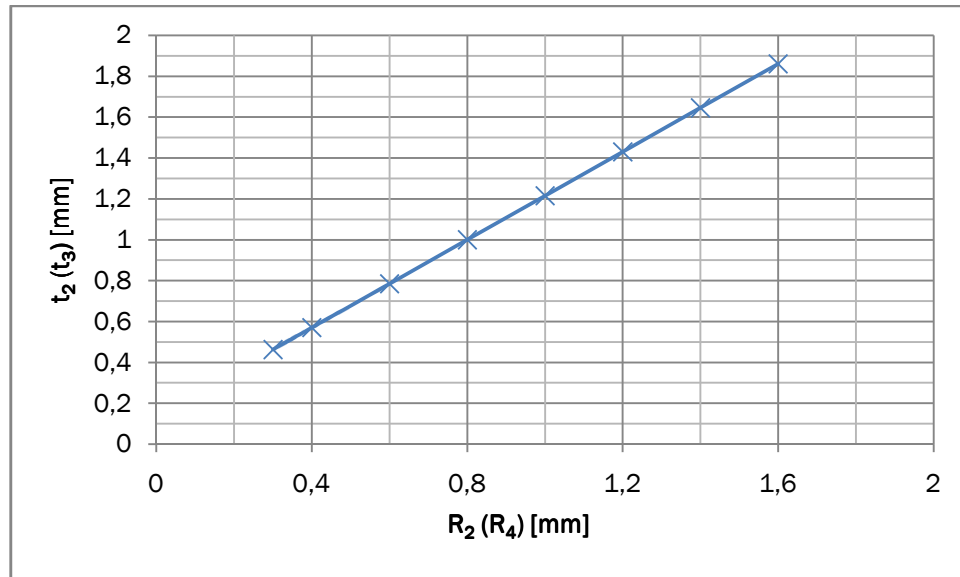
Tab. č. 4 - Změna tvarového parametru R_2

Rozměry tvarových parametrů s výsledky								
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Misses [Mpa]
1,8	0,3	1,8	0,3	1	0,463	0,463	45,11	0,8223
	0,4						39,59	0,5846
	0,6						37,09	0,5877
	0,8						28,08	0,5846
	1						25,08	0,6906
	1,2						22,07	0,4148
	1,4						17,63	0,3983
	1,6						16,29	0,4118

 Tab. č. 5 - Změna tvarového parametru R_4

Rozměry tvarových parametrů s výsledky								
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Misses [Mpa]
1,8	0,3	1,8	0,3	1	0,463	0,463	45,11	0,8223
			0,4				42,11	0,7438
			0,6				39,15	0,4686
			0,8				34,71	0,5256
			1				31,77	0,5602
			1,2				29,27	0,5596
			1,4				24,79	0,5702
			1,6				20,08	0,5047


 Graf č. 5 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_2 a R_4



Graf č. 6 - Závislost změny tloušťky t_2 (t_3) na velikosti zaoblení R_2 (R_4)

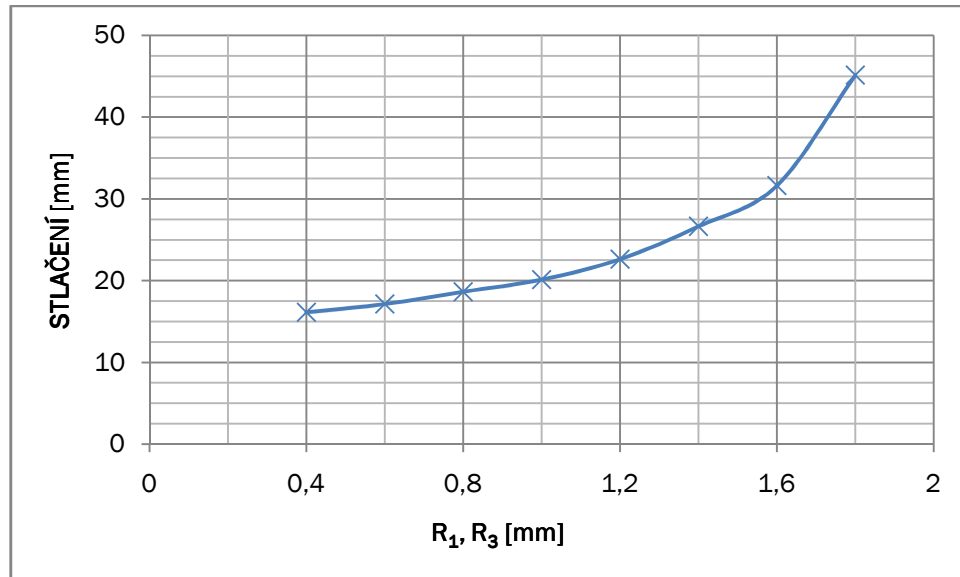
Z tabulky a grafu můžeme vyčíst, že se zvětšujícím se parametrem R_2 (R_4) dochází k nárůstu tloušťky v ohybu v místě t_2 (t_3). Tyto tloušťky se na rozdíl od předchozího případu navzájem při změně velikosti neovlivňují. Se zvětšujícím se rozměrem t_2 při změně R_2 a rozměrem t_3 při změně R_4 dochází ke zborcení při menších hodnotách velikosti stlačení.

11.2.3 Úprava velikosti vnitřních rádiusů R_1 a R_3 při stejné velikosti

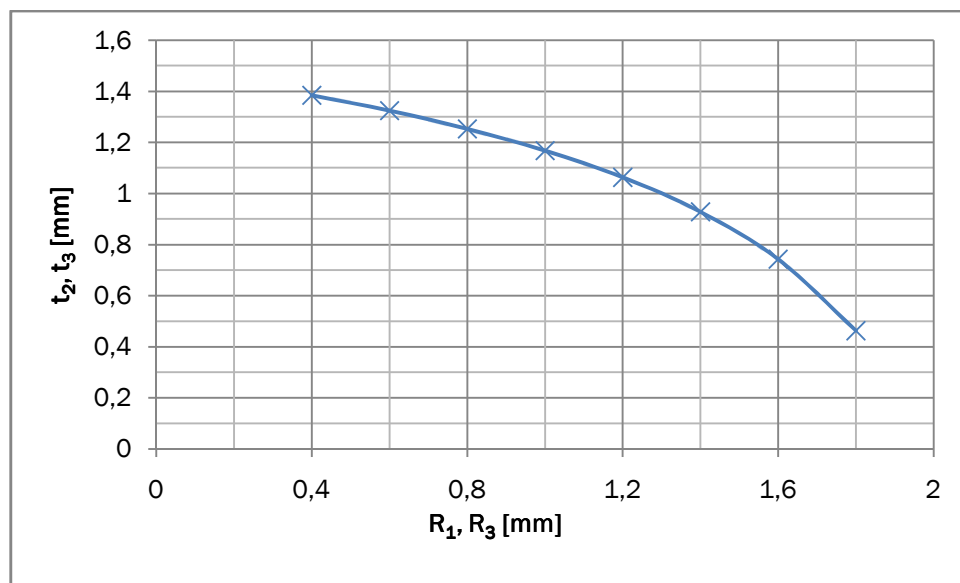
Následovalo vyhodnocení analýz změny tvarových parametrů R_1 a R_3 , kdy se tyto vnější rádiusy měnily současně, jak dokazuje (Tab. č. 6). Obě zaoblení byla postupně měněna z hodnoty 0,4 do 1,8 [mm]. Výsledky byly vyhodnoceny a zapsány do tabulky.

Tab. č. 6 - Změna tvarového parametru R_1 a R_3 při stejné velikosti

Rozměry tvarových parametrů s výsledky								
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Misses [Mpa]
1,8	0,3	1,8	0,3	1	0,463		45,11	0,8223
1,6		1,6			0,743	31,61	0,6340	
1,4		1,4			0,928	26,63	0,4770	
1,2		1,2			1,063	22,62	0,3581	
1		1			1,168	20,12	0,3870	
0,8		0,8			1,253	18,63	0,3173	
0,6		0,6			1,324	17,13	0,2849	
0,4		0,4			1,384	16,13	0,2920	



Graf č. 7 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_1 a R_3 změněných současně



Graf č. 8 - Závislost změny tloušťky t_2, t_3 na velikosti zaoblení R_1, R_3

Dle vyhodnocených výsledků s měnicími se rádiusy docházelo k nárůstu tloušťky ohybu v místě t_2 a t_3 . Tento fakt měl přímý vliv na chování manžety při stlačování, kdy při narůstající tloušťce v záhybech docházelo ke zborcení manžety v dřívějších fázích stlačování.

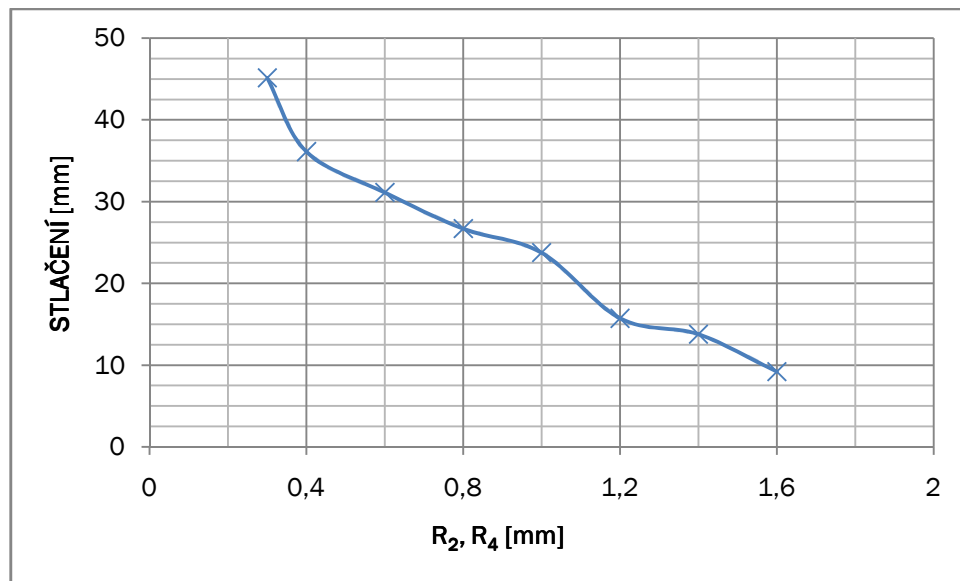
11.2.4 Úprava velikosti vnitřních rádiusů R_2 a R_4 při stejné velikosti

V tomto případě byly postupně měněny rádiusy R_2 a R_4 při zachování stejné velikosti. Tyto zaoblení tedy byly měněny jako u předchozího případu oba současně. Nejmenší rádius

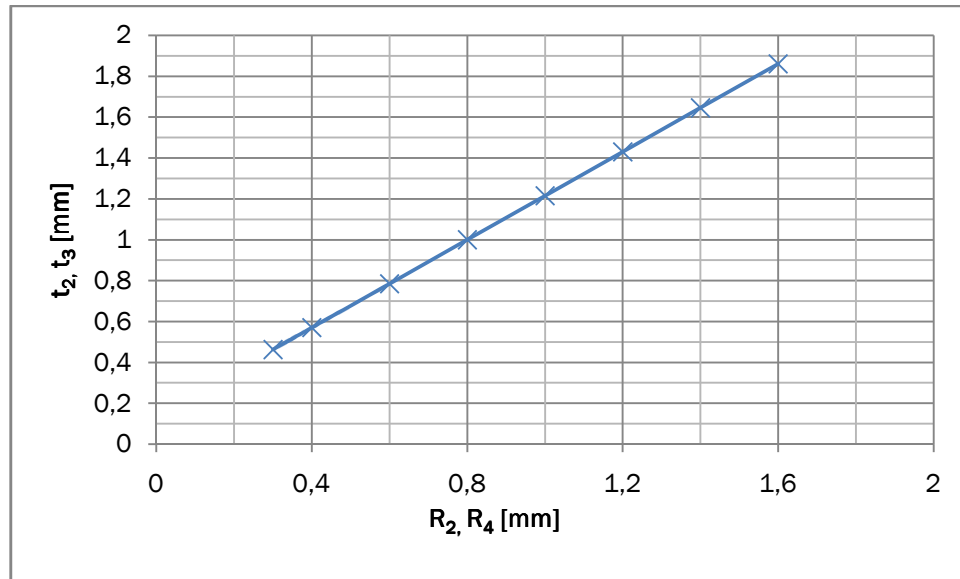
přitom měl velikost 0,3 mm a největší 1,6 mm. Dle zvoleného kritéria zborcení byla vyhodnocena velikost stlačení manžety při různých velikostech zaoblení.

Tab. č. 7 - Změna tvarového parametru R_2 a R_4 při stejné velikosti

Rozměry tvarových parametrů s výsledky									
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Mises [Mpa]	
1,8	0,3	1,8	0,3	1			0,463	45,11	0,8223
	0,4		0,4				0,570	36,10	0,6636
	0,6		0,6				0,785	31,11	0,5495
	0,8		0,8				1,000	26,69	0,4393
	1		1				1,215	23,75	0,4647
	1,2		1,2				1,430	15,72	0,2925
	1,4		1,4				1,645	13,78	0,3510
	1,6		1,6				1,860	9,21	0,3206



Graf č. 9 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_2 a R_4 změněných současně



Graf č. 10 - Závislost změny tloušťky t_2, t_3 na velikosti zaoblení R_2, R_4

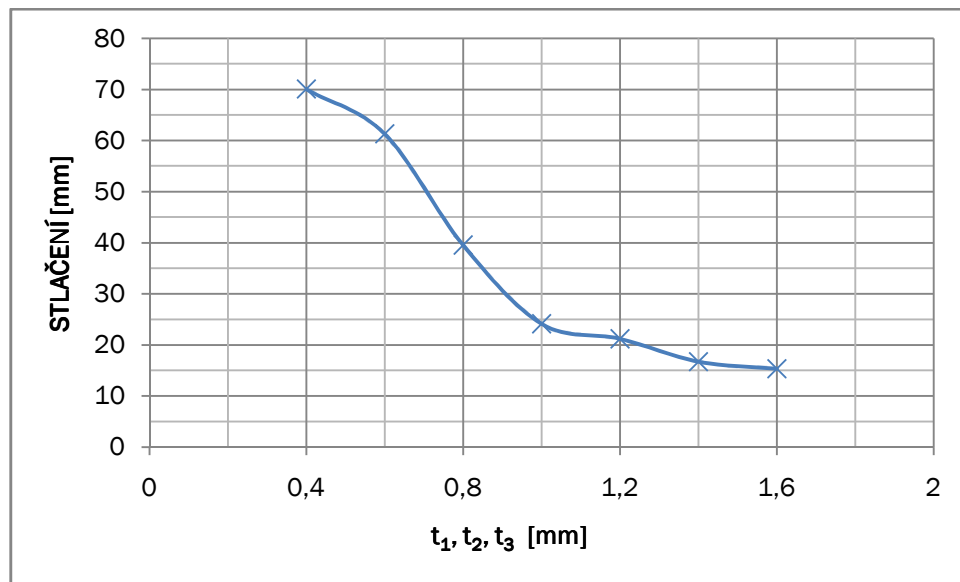
Výsledky byly nevyneseny do tabulky a byl sestrojen graf, který znázorňuje závislost velikosti rádiusů na velikosti stlačení. Druhý graf popisuje rostoucí tloušťku v ohybech se zvětšujícími se rádiusy R_2 a R_4 . Z výsledků je patrné, že se zvětšujícím se rádiusem R_2, R_4 dochází ke zvětšování tloušťky stěny v ohybu. S rostoucí tloušťkou dochází ke zborcení manžety již při malých velikostech stlačení.

11.2.5 Úprava velikosti tloušťek t_1, t_2, t_3 při stejné velikosti

U této úpravy byl navržen tvar manžety tak, aby byla dodržena konstantní tloušťka profilu po celé délce optimalizované části manžety. Tato tloušťka začínala na velikosti 0,4 mm a končila na 1,6 mm. Byly zachovány vnitřní rádiusy R_2 a R_4 , které zůstaly velikosti 0,3 mm. Toto zaoblení vnitřních rádiusů bylo zvoleno dle nejmenšího možného výrobitelného rozměru a také na základě provedených analýz, ze kterých vyplynulo, že při nejmenším rádiusu R_2, R_4 docházelo k největšímu stlačení, aniž by došlo ke zborcení manžety. U rádiusů R_1 a R_3 docházelo ke změnám velikosti, které byly součtem velikosti rádiusů R_2 (R_4) s velikostí tloušťky stěny t .

Tab. č. 8 - Změna tvarových parametrů t_1 , t_2 , t_3 při stejné velikosti

Rozměry tvarových parametrů s výsledky								
R_1 [mm]	R_2 [mm]	R_3 [mm]	R_4 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	t_3 [mm]	Stlačení [mm]	Von Mises [Mpa]
0,7	0,3	0,7	0,3	0,4			70,05	0,8132
0,9		0,9		0,6			61,30	0,9086
1,1		1,1		0,8			39,53	0,5637
1,3		1,3		1			24,13	0,4257
1,5		1,5		1,2			21,20	0,4208
1,7		1,7		1,4			16,73	0,3556
1,9		1,9		1,6			15,35	0,3618

Graf č. 11 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_2 a R_4

Z výsledků bylo opět potvrzeno, že se velikost stlačení odvíjí hlavně od tloušťky stěny (t_2 , t_3) v záhybech. Stlačení se u tohoto druhu úprav pohybovalo od velikosti 70 mm do velikosti 15,35 mm. Tento druh úpravy ve výsledcích vykazoval největšího rovnoměrného stlačení, aniž by došlo ke zborcení.

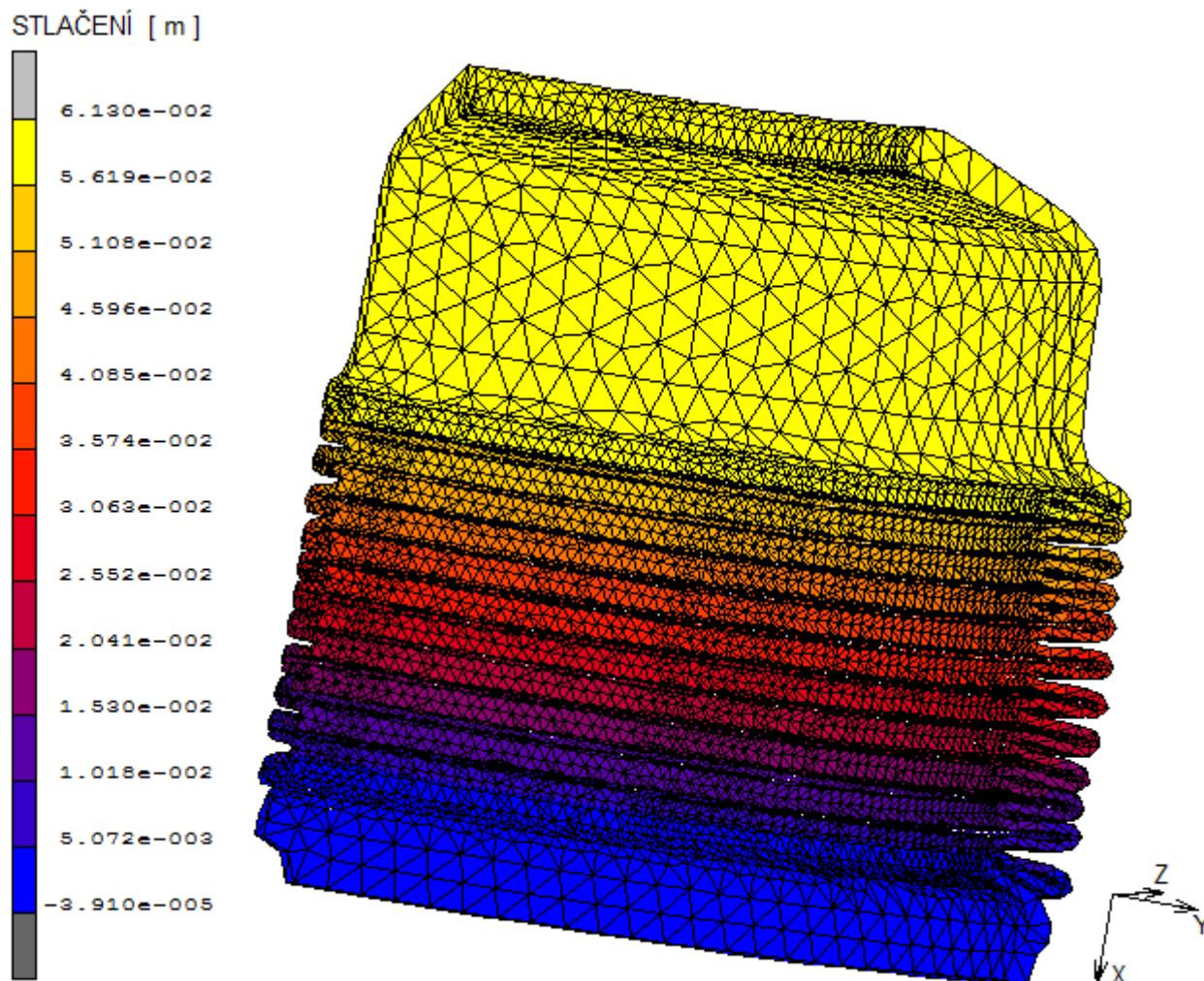
12 DISKUZE A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Výběr optimalizovaného tvaru manžety proběhl na základě výsledků předložených v předešlé kapitole. Z grafů byly dokázány vlivy tvarových parametrů nachování manžety při stlačování. Z výsledků provedených analýz vyplývá, že největšího stlačení manžety bylo dosaženo v případě, kdy byla tloušťka stěny optimalizované části výrobku konstantní.

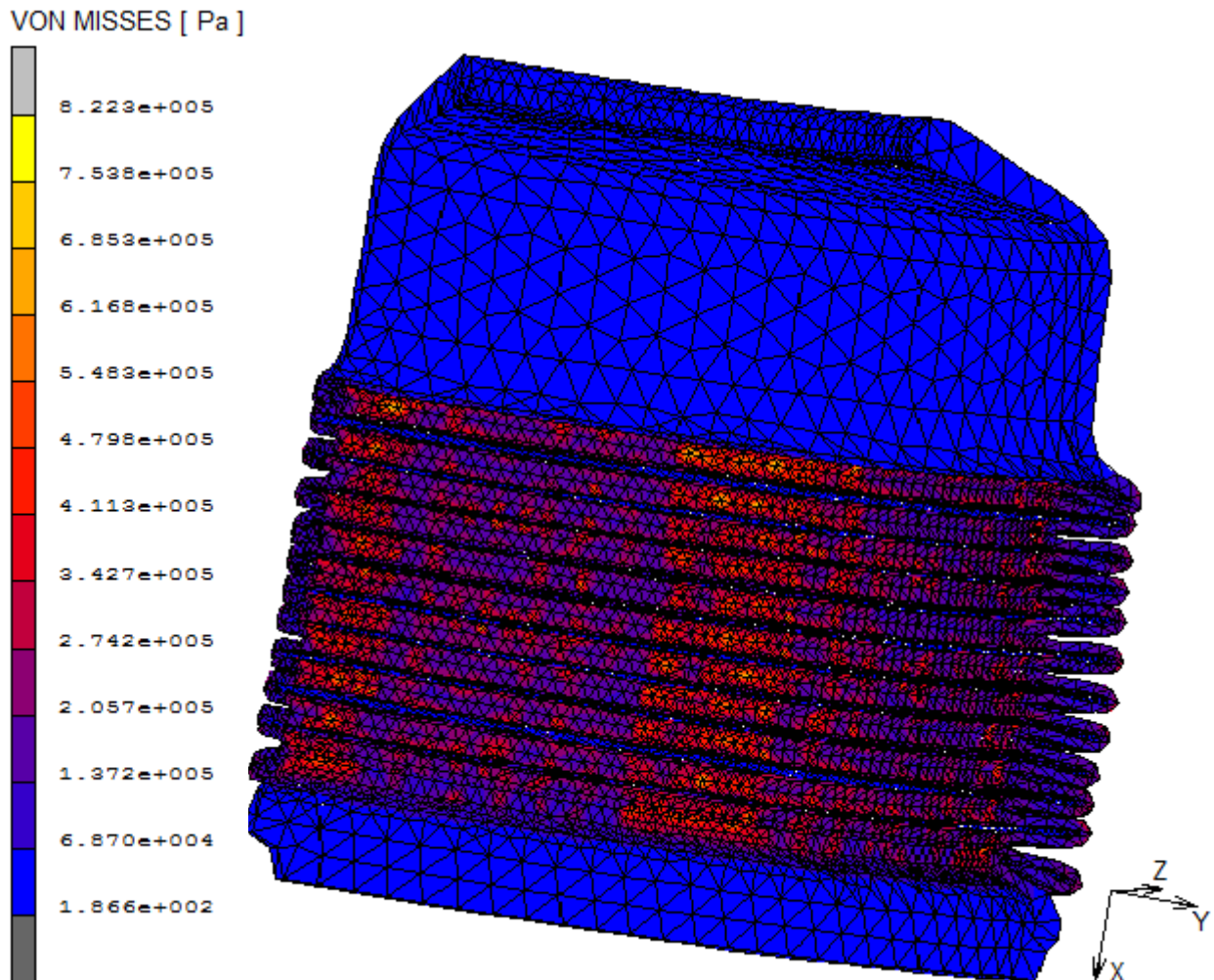
Největšího stlačení bylo dosaženo v případě, že tloušťka stěny byla velikosti 0,4 mm. Toto stlačení dosáhlo maximální, přednastavené hodnoty stlačení 70 mm. Je však nutné připomenout tloušťku stěny v záhybech u současného návrhu manžety, která činí 0,463 mm. Tloušťka stěny v záhybech (t_2 , t_3) tohoto návrhu však byla velikosti pouhých 0,4 mm. Tedy menší, než u původního návrhu, u kterého docházelo v těchto místech k praskání. Vzhledem k tomuto faktu byl tento model nevyhovující.

Druhého nejlepšího stlačení dosáhl model, který měl po celé optimalizované části výrobku velikost tloušťky profilu 0,6 mm. Tento model při stlačování vykazuje nejvhodnější chování, kdy bylo dosaženo optimálního rovnoměrného stlačení do hodnoty 61,3 mm. Model také vzhledem k současnému návrhu modelu vykazoval menšího posunu (vybočení) v osách X a Z, tyto hodnoty jsou součástí (*Tab. č. 9, 10*). Vzhledem k těmto okolnostem byl model vybrán jako vyhovující.

Tvar, velikosti stlačení a hodnoty Von Missesova napětí znázorňují následující obrázky.

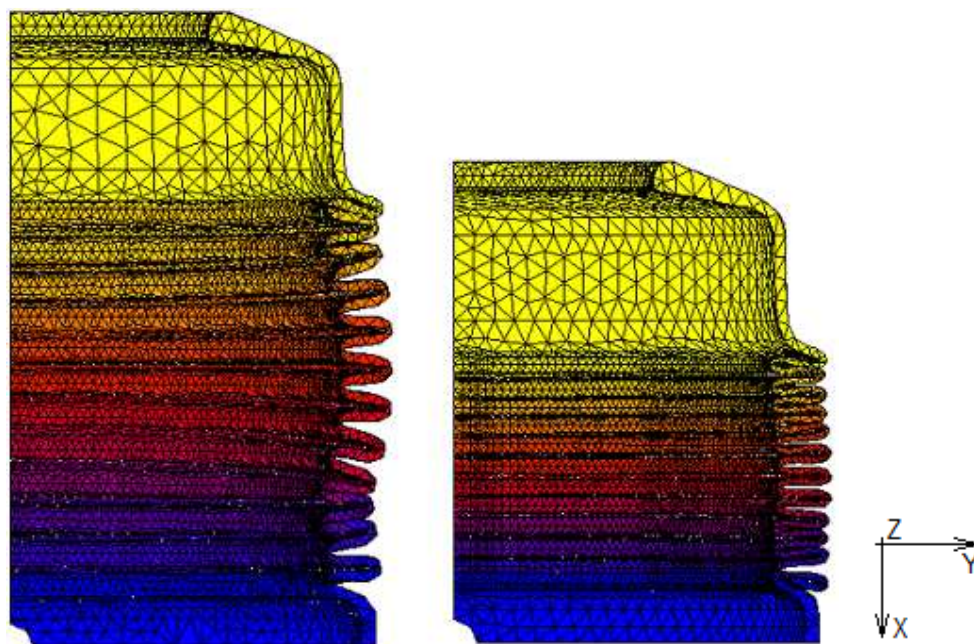


Obr. č. 69 – Maximální rovnoměrné stlačení optimalizované manžety

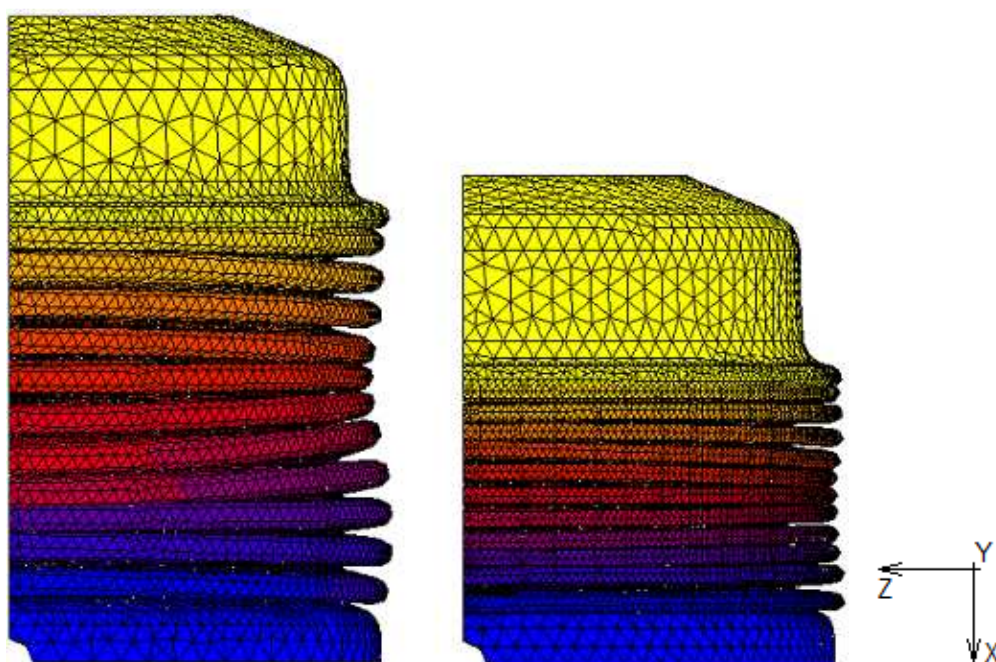


Obr. č. 70 – Von Missesovo napětí optimalizované manžety při maximálním rovnoměrném stlačení

Srovnání tvaru stlačené manžety současného a optimalizovaného tvaru a srovnání výsledků analýz je zobrazeno na následujících stránkách.



Obr. č. 71 – Tvar původní a optimalizované manžety při maximálním rovnoměrném stlačení – rovina XY



Obr. č. 72 – Tvar původní a optimalizované manžety při maximálním rovnoměrném stlačení – rovina XZ

Tab. č. 9 - Výsledky – původní návrh

Původní návrh		
Stlačení	[mm]	45,11
Vybočení - osa Y	[mm]	1,743
Vybočení - osa Z	[mm]	1,849
Von Misses	[MPa]	0,8223
Objem	[cm ³]	9,583

Tab. č. 10 - Výsledky – konečný návrh

Optimalizovaný návrh		
Stlačení	[mm]	61,3
Vybočení - osa Y	[mm]	1,284
Vybočení - osa Z	[mm]	1,013
Von Misses	[MPa]	0,9086
Objem	[cm ³]	7,235

Optimalizovaný tvar dosahuje větší velikosti rovnoměrného stlačení, aniž by došlo k vybočení a následujícím zborcení tvaru manžety. Optimalizací tvaru bylo podle provedených analýz dosaženo o 16,2 mm většího stlačení než u současného modelu, hodnota největšího maximálního rovnoměrného stlačení 61,3 mm překročila velikost požadovaného stlačení o 11,3 mm. Posuv (vybočení) ve směrech Y a Z, jak ukazují výsledkové tabulky, také nabýval menších hodnot. Velikosti Von Missesova napětí při největším rovnoměrném stlačení optimalizované manžety dosahovaly přibližně stejných hodnot jako u manžety původní. Z tabulek je také možné vidět, že optimalizovaná manžeta zaujímá menší objem oproti původnímu výrobku, tudíž by při výrobě této manžety došlo k úspoře materiálu. Tento tvar splňoval všechny požadavky, které byly po optimalizaci požadovány.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byl optimalizován tvar pryžové manžety tak, aby došlo k požadovanému rovnoměrnému stlačování, aniž by došlo ke zborcení.

Před výpočtem samostatných analýz pomocí konečně-prvkového softwaru bylo potřeba vymodelovat současný model manžety dle výkresu. Na základě současných rozměrů výrobku byly určeny tvarové parametry, které bylo dovolené upravovat. Poté byla vytvořena řada modelů manžet, u kterých se vybrané tvarové parametry měnily.

Pro tyto 3D modely výrobků byla nastavena analýza pro FEM software MSC.Patran. Byl importován model výrobku, na kterém bylo provedeno vysíťování. Také byl z dat laboratorních zkoušek nadefinován materiál a byly vytvořeny okrajové podmínky, kdy dolní plocha manžety byla uchycena pevně, bylo zde tedy zabráněno v jakémkoliv posuvu. V horní části manžety byl na jedné z ploch nadefinován posuv ve směru stlačení o hodnotě 70 mm. Po takto nastavené analýze u každého z modelů byl proveden výpočet.

Z výsledků bylo evidentní, že každá z manžet se začala bortit při rozdílné velikosti stlačení. Tento okamžik byl posuzován podle tzv. kritéria zborcení. To je hranice, po které u výrobku začíná docházet k nežádoucímu vybočení a následnému zborcení. Pro posuzování této hranice byly použity výsledky hodnot posuvu ve směru Y a Z, tedy ve směrech kolmých na směr stlačování.

Dle tohoto kritéria byly vyhodnoceny výsledky, které byly zpracovány v podobě tabulek spolu s grafy. Byly dokázány vlivy tvarových parametrů na chování manžety při jejím stlačování. Z těchto výsledků byl nakonec vybrán konečný optimalizovaný tvar manžety.

Vybraný model měl stejnou tloušťku stěny výrobku po celé délce optimalizované části manžety. Rovnoměrného stlačení u tohoto modelu bylo dosaženo do velikosti 61,3 mm, což je oproti současnému návrhu polepšení o 26%. U optimalizovaného návrhu také dochází k menším posuvům (vybočením) ve směrech os Y a Z, tento fakt svědčí o rovnoměrnějším průběhu stlačování optimalizovaného tvaru manžety. Model, který byl vybrán, odpovídá požadavkům, které byly na začátku práce dány.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FRANTA, Ivan. *Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha : SNTL, 1969. 536 s.
- [2] KNEDLA, Boleslav. *Technická pryž*. Vyd. 1. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975. 179 s.
- [3] HOLUB, Josef. *Pryž jako konstrukční materiál*. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1967. 265 s.
- [4] JAVOŘÍK, Jakub. *Hyperelasticita*. Zlín, 9 s. Učební text. UTB.
- [5] DVOŘÁK, Zdeněk. *Zpracovatelské procesy gumárenské : Pro konstrukční směry*. Zlín : UTB, 2009. 130 s.
- [6] MSC.Software Corporation. *Introduction to MSC.Marc and Mentat*. October 2007. 764 s.
- [7] DVOŘÁK, Zdeněk; JAVOŘÍK, Jakub. *Konstrukce výrobků : Konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu*. Zlín : UTB, 2009. 146 s.
- [8] ŠTĚPÁN, Miroslav. *Teoretické základy*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 378 s.
- [9] KOVAŘÍK, Antonín. *Konstrukce výrobků z technické pryže*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1962. 111 s.
- [10] MSC.Software Corporation. *Patran 2010 : User's Guide*. 2010. 228 s.
- [11] KOMÁREK, Zdeněk. *Přehled výroby pryže*. 1. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1973. 326 s.
- [12] PREKOP, Štefan. *Gumárska technológia I*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita, 1998. 282 s. ISBN 8071004839.
- [13] KUBÍK, Josef; ZYTKA, Arnošt. *Zkušební metody v gumárenství*. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 297 s.
- [14] DVOŘÁK, Zdeněk. *Základy výrobních procesů : Konstrukce gumárenských výrobků a forem pro jejich výrobu*. Zlín : UTB, 2007. 62 s.
- [15] DVOŘÁK, Zdeněk; LAMBOROVÁ, Romana. *Základy výrobních procesů I : Konstrukční materiály polymerní a kompozity*. Zlín : UTB, 2008. 64 s.

- [16] FUSEK, Martin; FRYDRÝŠEK, Karel; HRABEC, Jan. *Praktikum software MSC.MARC/MENTAT. Část 2.* Ostrava : VŠB, 2010. 75 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

W	hustota deformačního potenciálu [Pa]
I	deformační invariant
c_{ij}	materiálové konstanty [Pa]
FEM	Finite Element Method
μ	počáteční smykový modul [Pa]
n	Počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu
k	Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]
T	teplota [K]
λ_L	limitní protažení
E	modul pružnosti v tahu (tlaku) [Pa]
I_m	limitní hodnota deformačního invariantu
μ_i	materiálová konstanta
α_i	materiálová konstanta
K	objemový modul pružnosti [Pa]
R	poloměr oblouku [mm]
t	tloušťka stěny [mm]
D	značka průměru [mm]
F	velikost zatěžovací síly [N]
S	čelní plocha zkušebního tělesa [mm^2]
σ	napětí v tahu (tlaku) [MPa]
Δl	poměrné prodloužení [mm]
ε	poměrná deformace [%]
l	délka vzorku po deformaci [mm]
l_0	původní délka vzorku [mm]

l_p	délka pracovní části při přetržení [mm]
ε_p	poměrné prodloužení při přetržení
h	výška vzorku po deformaci [mm]
h_o	počáteční výška vzorku [mm]
ν	Poissonovo číslo [-]
G_s	statický modul pružnosti ve smyku [Pa]
τ	smykové napětí [Pa]
γ	zkos [-]
f	velikost deformace [mm]
s	výška vzorku před zkouškou [mm]
IRHD	International Rubber Hardness Degrees
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
MKP	Metoda konečných prvků
FEA	Final Element Analysis

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. č. 1 - Struktura polymerů [15].....</i>	14
<i>Obr. č. 2 - Strukturní vzorec SBR</i>	17
<i>Obr. č. 3 - Strukturní vzorec BR</i>	18
<i>Obr. č. 4 - Strukturní vzorec NBR.....</i>	18
<i>Obr. č. 5 - Strukturní vzorec CR</i>	19
<i>Obr. č. 6 - Strukturní vzorec IR</i>	19
<i>Obr. č. 7 - Strukturní vzorec IIR</i>	19
<i>Obr. č. 8 - Strukturní vzorec Q</i>	20
<i>Obr. č. 9 - Strukturní vzorec EPDM</i>	20
<i>Obr. č. 10 - Strukturní vzorec UR, U</i>	20
<i>Obr. č. 11 - Vulkanizační křivka</i>	28
<i>Obr. č. 12 - Závislost napětí a deformace při zatěžování elastomeru [4]</i>	29
<i>Obr. č. 13 - Příklad chování konkrétního elastomeru v jednotlivých</i>	34
<i>Obr. č. 14 - Jednoosý tah [7]</i>	35
<i>Obr. č. 15 - Dvouosý tah [7].....</i>	35
<i>Obr. č. 16 - Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorků [7]</i>	35
<i>Obr. č. 17 - Čistý smyk [7].....</i>	36
<i>Obr. č. 18 - Správně - tloušťka stěn je stejnoměrná, přechody pozvolné</i>	38
<i>Obr. č. 19 - Špatně - rozdílná tloušťka stěn, náhlý přechod</i>	38
<i>Obr. č. 20 - Správně - přechod je pozvolný</i>	38
<i>Obr. č. 21 - Špatně - náhlý přechod.....</i>	38
<i>Obr. č. 22 - Správně - stejnoměrná tloušťka stěn, přechody zaobleny</i>	38
<i>Obr. č. 23 - Špatně - nestejná tloušťka stěn, nevhodně zaoblený přechod</i>	38
<i>Obr. č. 24 - Správně, hrany jsou zaobleny.....</i>	39
<i>Obr. č. 25 - Špatně - hrany jsou ostré a výrobek obsahuje zářezy</i>	39
<i>Obr. č. 26 - Správně - tenký okraj je vyztužen [7]</i>	39
<i>Obr. č. 27 - Špatně, tenký okraj může být zaměněn s přetokem [7]</i>	39
<i>Obr. č. 28 - Správně - okrajová vlákna jsou odlehčena [7]</i>	40
<i>Obr. č. 29 - Špatně, při zatížení se pryž v okrajích snadno odtrhne [7].....</i>	40
<i>Obr. č. 30 - Správně - ochranný měch je kuželový</i>	41
<i>Obr. č. 31 - Špatně, ochranný měch je válcový, obtížně se snímá z jádra při výrobě</i>	41
<i>Obr. č. 32 - Správně, hrany jsou zaobleny, uchycení je provedeno zvenčí [7]</i>	41

<i>Obr. č. 33 - Špatně, ostré hrany, uchycením součásti je zvětšen vnitřní průměr[7]</i>	41
<i>Obr. č. 34 - Správně - Otvor nemá ostré kouty</i>	42
<i>Obr. č. 35 - Špatně - v ostrých koutech při deformaci pružiny dochází ke koncentraci napětí</i>	42
<i>Obr. č. 36 - Otvory v pryžových výrobcích</i>	42
<i>Obr. č. 37 - Správně – v místě dělicí roviny je stěna tlustší.....</i>	44
<i>Obr. č. 38 - Špatně – V místě dělicí roviny může dojít k poškození stěny při odstraňování přetoku.....</i>	44
<i>Obr. č. 39 - Správně – Těsnění je v místě otvorů rozšířeno.....</i>	46
<i>Obr. č. 40 - Špatně – zeslabené těsnění v místě otvorů</i>	46
<i>Obr. č. 41 - Těsnící kroužek s kruhovým průřezem</i>	47
<i>Obr. č. 42 - Příklad tvaru drážek a odpovídajícího tvaru těsnění</i>	47
<i>Obr. č. 43 - Příklad utěsnění kroužkem kruhového průřezu.....</i>	47
<i>Obr. č. 44 - Základní tvary pryžových manžet (zleva jazýčková, misková M, profilová U, profilová Y).....</i>	48
<i>Obr. č. 45 - Hřídelové těsnění Gufero (1 - pryž, 2 - kovový kroužek, 3 - kruhová pružina, 4, 5 - těsnící břity)</i>	49
<i>Obr. č. 46 – Pracovní diagram dvou různých elastomerů se stejnou mezí pevnosti (A – pryž s vysokým modulem, B – pryž s nízkým modulem)</i>	51
<i>Obr. č. 47 – Schéma zkušebních těles pro tahové zkoušky</i>	51
<i>Obr. č. 48 - Schéma tlakové zkoušky</i>	53
<i>Obr. č. 49 - Smykové namáhání</i>	54
<i>Obr. č. 50 - Schéma Schobova přístroje pro zkoušení odrazové pružnosti</i>	56
<i>Obr. č. 51 - Schéma přístroje Lüpke pro zkoušení odrazové pružnosti</i>	56
<i>Obr. č. 52 – Postup analýzy</i>	61
<i>Obr. č. 53 – Základní rozměry manžety.....</i>	63
<i>Obr. č. 54 – Ukázka celkového modelu manžety</i>	64
<i>Obr. č. 55 – Čtvrtinový model manžety</i>	64
<i>Obr. č. 56 – Importovaný 3D model manžety</i>	66
<i>Obr. č. 57 – Element typu Tet [6]</i>	68
<i>Obr. č. 58 – Model po vysítování</i>	68
<i>Obr. č. 59 – Posuv</i>	69
<i>Obr. č. 60 - Uložení</i>	69

<i>Obr. č. 61 – Symetrie podle rovin YX a ZX.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. č. 62 – Ukázka zborcení manžety během stlačování</i>	<i>71</i>
<i>Obr. č. 63 – Tvarové parametry</i>	<i>72</i>
<i>Obr. č. 64 – Znázornění posuvů při stlačování.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. č. 65 - Znázornění chování manžety před zborcením.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. č. 66 - Znázornění chování manžety během zborcení.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. č. 67 – Maximální rovnoměrné stlačení současného modelu.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. č. 68 – Von Missesovo napětí současné manžety při maximálním rovnoměrném stlačení.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. č. 69 – Maximální rovnoměrné stlačení optimalizované manžety.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. č. 70 – Von Missesovo napětí optimalizované manžety při maximálním rovnoměrném stlačení</i>	<i>88</i>
<i>Obr. č. 71 – Tvar původní a optimalizované manžety při maximálním rovnoměrném stlačení– rovina XY</i>	<i>89</i>
<i>Obr. č. 72 - Tvar původní a optimalizované manžety při maximálním rovnoměrném stlačení – rovina XZ</i>	<i>89</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. č. 1 - Rozměry tvarových parametrů a vybrané výsledky analýzy.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. č. 2 - Změna tvarového parametru R_1.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. č. 3 - Změna tvarového parametru R_3.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. č. 4 - Změna tvarového parametru R_2.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. č. 5 - Změna tvarového parametru R_4.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. č. 6 - Změna tvarového parametru R_1 a R_3 při stejné velikosti</i>	<i>81</i>
<i>Tab. č. 7 - Změna tvarového parametru R_2 a R_4 při stejné velikosti</i>	<i>83</i>
<i>Tab. č. 8 - Změna tvarových parametrů t_1, t_2, t_3 při stejné velikosti.....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. č. 9 - Výsledky – původní návrh.....</i>	<i>90</i>
<i>Tab. č. 10 - Výsledky – konečný návrh</i>	<i>90</i>

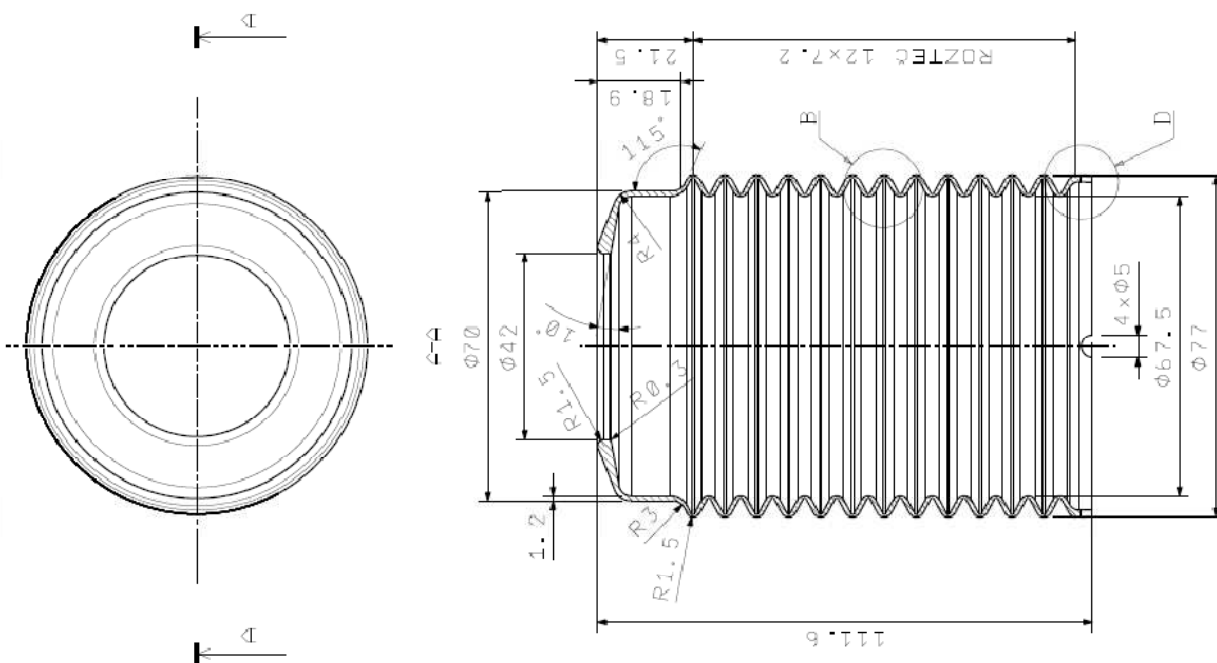
SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf č. 1 - Porovnání výsledků zkoušek pryže s James-Green-Simpson modelem.....</i>	<i>67</i>
<i>Graf č. 2 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_1 a R_3.....</i>	<i>78</i>
<i>Graf č. 3 - Závislost změny tloušťky t_2 (t_3) na velikosti zaoblení R_1 (R_3).....</i>	<i>78</i>
<i>Graf č. 4 - Závislost změny tloušťky t_2 a t_3.....</i>	<i>79</i>
<i>Graf č. 5 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_2 a R_4.....</i>	<i>80</i>
<i>Graf č. 6 - Závislost změny tloušťky t_2 (t_3) na velikosti zaoblení R_2 (R_4).....</i>	<i>81</i>
<i>Graf č. 7 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_1 a R_3 změněných současně.....</i>	<i>82</i>
<i>Graf č. 8 - Závislost změny tloušťky t_2, t_3 na velikosti zaoblení R_1, R_3.....</i>	<i>82</i>
<i>Graf č. 9 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_2 a R_4 změněných současně.....</i>	<i>83</i>
<i>Graf č. 10 - Závislost změny tloušťky t_2, t_3 na velikosti zaoblení R_2, R_4.....</i>	<i>84</i>
<i>Graf č. 11 - Závislost velikosti stlačení na změnu tvarových parametrů R_2 a R_4.....</i>	<i>85</i>

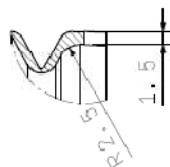
SEZNAM PŘÍLOH

P I: Výkres původní manžety

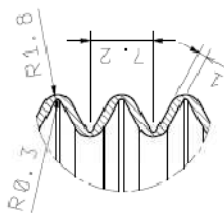
PŘÍLOHA PI: VÝKRES PŮVODNÍ MANŽETY



Detail D
Scale: 2:1



Detail B
Scale: 2:1



Číslo kresby	1	0	0	0	0	0
Číslo části	01	0	0	0	0	0
Číslo listu	01	0	0	0	0	0
ZÁVĚS	Přívz	T.L.	HUMMIST kg	UTB Zlín		
ROZMĚRY	PRŮT.					16%
VED.	760		CSN			18%
VED.	Jam Továrn	MOCHLEF.	PRON			Č. KRESBY
TEHL.		SHHIL	STŘEK V.			Č.V.
PRŮV.						
MANŽETA				Listo	List	